

RICARDO BARBOSA POSCH SIQUEIRA

**EMISSÕES DE POLUENTES EM CENTRAIS HIDRELÉTRICAS: ASPECTOS
TÉCNICOS, ECONÔMICOS E ECOLÓGICOS**

RICARDO BARBOSA POSCH SIQUEIRA

**EMISSÕES DE POLUENTES EM CENTRAIS HIDRELÉTRICAS: ASPECTOS
TÉCNICOS, ECONÔMICOS E ECOLÓGICOS**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual
Paulista, para a obtenção do título de Doutor em
Engenharia Mecânica na área de Transmissão e
Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

Guaratinguetá
2015

S618e	Siqueira, Ricardo Barbosa Posch Emissões de poluentes em centrais hidrelétricas: aspectos técnicos, econômicos e ecológicos / Ricardo Barbosa Posch Siqueira - Guaratinguetá, 2015 141 f.: il. Bibliografia: f. 135-141 Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015 Orientador: Prof. Dr. Jose Luz Silveira 1. Usinas hidrelétricas 2. Água – Qualidade 3. Efeito estufa (Atmosfera) 4. Análise econômico financeiro I. Título CDU 621.311.21
-------	---

RICARDO BARBOSA POSCH SIQUEIRA

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA"**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Edson Cocchiari Botelho
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ LUZ SILVEIRA
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. SILVIO JORGE COELHO SIMÕES
UNESP/FEG


Prof. Dr. DANIEL JULIEN BARROS DA SILVA SAMPAIO
UNESP/FEG


Prof. Dr. JOSÉ RUI CAMARGO
UNITAU


Prof. Dr. WENDELL DE QUEIROZ LAMAS
EEL/USP

Fevereiro de 2015

DADOS CURRICULARES

RICARDO BARBOSA POSCH SIQUEIRA

NASCIMENTO	03.08.1976 – SÃO PAULO / SP
FILIAÇÃO	José Antônio Posch Siqueira Teresa Barbosa Posch Siqueira
1992/1994	Curso Técnico em Eletrônica Colégio Técnico e Industrial de Guaratinguetá - CTIG – UNESP Campus de Guaratinguetá.
1996/2001	Curso de Graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica Universidade de Taubaté – UNITAU
2003/2006	- Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

Publicações:

- SIQUEIRA, R.B.P.; SILVEIRA, J.L.; SOBRINHO P.M.; CARVALHO, M.B. Cogeneration Utilising Residual Heat of na Industrial Incinerator. In: LATIN AMERICAN CONGRESS ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 5., 2003, São Pedro – SP. **Proceedings**, 2003.

- SIQUEIRA, R.B.P.; SILVEIRA, J.L. Construção de Diagramas de Custos de PCH's. Incorporando Turbinas de Mercado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 4., 2004, Porto de Galinhas – PE, **Anais do IV Simpósio Brasileiro de Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas**, 2004.

- SIQUEIRA, R.B.P.; SILVEIRA, J.L. Análise de Eficiência Energética Aplicada a uma Pequena Central Hidrelétrica aliada ao Retorno de Investimento. In: INTERNATIONAL SODEBRAS CONGRESS, 24., 2010, São Paulo – SP. **Sodebras**, 2010.

- SIQUEIRA, R.B.P.; SILVEIRA, J.L. Eficiência Ecológica Aplicada a uma PCH Em Função da Operação de um Reservatório Hipotético. In: CONFERÊNCIA DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 7., 2011, São Paulo - SP. **Anais da VII Conferência de Centrais Hidrelétricas**, 2011.

- SIQUEIRA, R.B.P.; SILVEIRA, J.L. Aspectos Técnicos, Econômicos e Ecológicos de PCH's: Seleção de Turbinas e Análise de Emissões. In: CLAGTEE - LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 9., 2011, Mar de La Plata – Argentina. **Anais do 9º Congresso Latino Americano de Geração e Transporte de Energia Elétrica**, 2011.

Dedico de modo especial, à minha Família e ao meu pai José Antônio Posch Siqueira (em memória), que foi professor do Colégio Técnico desse Campus e me incentivou muito nesta caminhada da vida com grande expectativa de que esse momento acontecesse. Até breve!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a *Deus*, pelo dom da vida e por ter pessoas que amo ao meu lado, sempre me incentivando.

À minha esposa *Liziane*, pelo infindável companheirismo e a nossos filhos, *Carolina* e *Matheus*, por todos os momentos de alegria que passamos juntos.

À minha *mãe* e ao meu *pai*, por terem me proporcionado tudo o que sou e tenho hoje.

Ao meu irmão *Rodrigo*, pela amizade e palavras de incentivo nos momentos difíceis.

Ao Prof. Dr. *José Luz Silveira*, por ter aceitado ser novamente meu orientador e por ter me auxiliado na elaboração desta Tese.

Aos Profs. Drs. *Agnelo Marotta Cassula*, *Daniel Julien Barros da Silva Sampaio*, *José Rui Camargo*, *Sílvio Jorge Coelho Simões* e *Wendell de Queiróz Lamas*, pelas críticas construtivas em relação a esta Tese.

Aos Colegas do Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos (LOSE), pelo apoio e pelo incentivo.

Aos sempre atenciosos funcionários da Secretaria de Pós-Graduação da FEG.

Aos meus ex-gestores, *Dr. Manuel Gonçalves*, *Tadeu Azevedo* e *César Poletto*, pelo grande incentivo que me deram no início de minha pós-graduação.

Aos Engenheiros da ALSTOM, em especial aos Engs. *Adilson Costilhas*, *Márcio Oliveira*, *Ricardo Vasconcellos*, *Roberto Miranda*, *Alencar Ribeiro* e *Maurício Oliveira*, pelo grande incentivo que me deram na conclusão de minha pós-graduação.

Ao Eng. *Fábio Sá*, pela amizade e pela oportunidade em continuar meus estudos na Pós-Graduação.

Aos amigos *Anderson Rodrigues*, *Fábio Garcia*, *Fernando Scarparo* (em memória) e *Darcy Laranjeira*, pela amizade e palavras de incentivo.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

“CAMINHADA DA VIDA.

Como se despedir de uma pessoa tão especial em um
momento tão difícil?

Seria...

Agradecer por tudo que tem feito, deixado ou realizado?

Seria...

Lembrar de todos os momentos especiais com a imagem
de seu sorriso e de seu carinho com os próximos?

Seria...

Imaginar que a vida ao lado dele foi muito importante
para aprendermos sobre companheirismo, o respeito, o
amor, a dedicação da vida pessoal e profissional?

Seria...

Orar pelo aprendizado da palavra Igreja em nossa Vida?

Seria...

Admirar o olhar afetuoso e de atenção sempre que um
auxílio fosse solicitado?

Seria...

Chorar de Saudades?

Na verdade, podemos sentir que realmente a vida é uma
caminhada que não tem fim.

Estaremos sempre com ele em pensamentos felizes e
convictos que nosso reencontro acontecerá.

Então...

ATÉ BREVE!”

Família Posch

SIQUEIRA, R. B. P. **Emissões de poluentes em centrais hidrelétricas: Aspectos técnicos, econômicos e ecológicos.** 2015. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Os reservatórios das Centrais Hidrelétricas contribuem para o aumento dos Gases de Efeito Estufa (GEE), emitindo dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), que são nocivos para o aquecimento global. Esse trabalho de tese tem como objetivo desenvolver uma metodologia que permita avaliar as hidrelétricas acerca do aspecto ambiental e de sua eficiência ecológica. Analisar uma planta hidrelétrica sob o ponto de vista da eficiência ecológica implica em determinar o indicador de poluição para verificar quão poluidor é o processo de geração de eletricidade da usina. Inicialmente, utiliza-se um modelo de reservatório que considera o regime operacional da usina, correlacionando-o às variáveis de volume, área alagada, qualidade da água e carga do reservatório. A metodologia baseia-se em modelo estático/computacional, utilizando o Programa Excel® e considerando um reservatório cuja característica de seção e volume é a de uma figura plana trapezoidal. O estudo considera as características das usinas hidrelétricas de Itaipu e de Tucuruí, das quais é possível obter as emissões médias de CO_2 e CH_4 . Desenvolvem-se as equações para a determinação das emissões equivalentes de tC e tCO_2 , as quais auxiliam no desenvolvimento e validação do modelo e do estudo do impacto ambiental e na determinação da eficiência ecológica da usina hidrelétrica. Essas equações são escritas em função da carga do reservatório e do índice de qualidade da água, que considera o oxigênio dissolvido saturado ($\text{OD}_{\text{Sat}\%}$). Para a determinação da carga do reservatório, considera-se a analogia elétrica (Circuito Resistor-Capacitor), onde o reservatório é considerado equivalente a um capacitor e a turbina hidráulica equivalente a uma resistência elétrica. Na análise ambiental, utiliza-se a emissão equivalente de CO_2 ($\text{tCO}_{2\text{eq}}$) para determinar o indicador de poluição e a eficiência ecológica da usina hidrelétrica em função do índice de aquecimento global (GWP). Conclui-se, através do modelo desenvolvido, que o regime operacional da usina hidrelétrica e as séries históricas de vazões do rio influenciam no comportamento das emissões de GEE e que o GWP afeta diretamente a viabilidade econômica da usina hidrelétrica.

PALAVRAS-CHAVE: Emissões de GEE. Usinas hidrelétricas. Eficiência ecológica. Qualidade da água. Modelo estático computacional. Análise econômica.

SIQUEIRA, R. B. P. **GHG emissions of power plants: Technical, economical and ecological aspects.** 2015. 141 f. Thesis (Philosophy Doctor degree in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

The reservoir of the hydropower plants contributes to increased emissions of greenhouse gases (GHG), emitting carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄), that are harmful gases to the global warming. This work aims to develop a methodology that assess the hydroelectric powerplants on the environmental aspect and its ecological efficiency. Analyze the hydroelectric to the ecological efficiency considers the pollution indicator to determine how polluter is a process of electricity generation. Initially, used a reservoir model where consider the operating system of the plant, correlating it to the variable volume, flooding area, water quality and load of the reservoir. The methodology is based on the static / computational model using a software tool (Excel®) and considering a reservoir whose characteristic of the section and volume are related to a trapezoidal plane figure. The study considers the characteristics of the hydroelectrics Itaipu and Tucuruí, which can be obtained the average emissions of CO₂ and CH₄. The equations are developed to tC and tCO₂ equivalent emissions, which support in the development and validation of the model and of the environmental impact study, and in the determination of the hydropower ecological efficiency. Those equations are written as a function of the reservoir load and water quality index, that considers dissolved oxygen saturated (OD_{Sat}%). To determine the load of reservoir is considered an electrical analogy (Resistor-Capacitor Circuit), where the reservoir is equivalent to a capacitor and the turbine equivalent to electrical resistance. In the environmental analysis, it is used the equivalent emission of CO₂ (tCO_{2eq}) to determine the pollution indicators and the ecological efficiency of the hydroelectric plant, including the Global Warming Potential (GWP). Concludes with the developed model that the operating regime of the hydroelectric plant and the historical data of river flow influence the behavior of GHG emissions and that the global warming index (GWP) affects directly the economic viability of the hydroelectric plant.

KEYWORDS: GHG Emissions. Hydroelectric plants. Ecological efficiency. Water Quality. Computational/static Model. Economic analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia básica	22
Figura 2 – Arranjo geral em planta de uma usina hidrelétrica.....	35
Figura 3 – Arranjo geral em corte de uma usina hidrelétrica	36
Figura 4 – Gráfico das faixas de aplicação de turbinas Pelton, Kaplan e Francis.....	37
Figura 5 – Modelo 3D de uma turbina tipo Pelton com 4 injetores.	38
Figura 6– Roda de uma turbina Francis em processo de fabricação	38
Figura 7 – Modelo 3D de uma turbina Kaplan	39
Figura 8 – Esquema típico de geração de energia em baixa queda.	41
Figura 9 – Esquema típico de geração de energia em alta queda.	41
Figura 10 – Esquema típico de geração de energia em média queda.	42
Figura 11 – Estrutura típica de usina hidrelétrica em baixa queda – UHE Balbina. ..	43
Figura 12 – Estrutura típica de usina hidrelétrica em alta queda – UHE Henry Borden.	44
Figura 13 – Estrutura típica de usina hidrelétrica em média queda - UHE Itaipu.....	45
Figura 14 – Curva de permanência - UHE Balbina.....	46
Figura 15 – Curva de permanência - UHE Henry Borden.....	47
Figura 16 – Curva de permanência - UHE Itaipu.....	47
Figura 17 – Usinas hidrelétricas segundo a área alagada.	48
Figura 18 – Vazões mensais do ano típico - UHE Balbina.	49
Figura 19 – Vazões mensais do ano típico - UHE Henry Borden.	49
Figura 20 – Vazões mensais do ano típico - UHE Itaipu.	49
Figura 21 – Modelos empíricos de reservatórios - IHA.....	57
Figura 22 – Modelo geométrico de reservatório - MCT.	57
Figura 23 – Modelagem trapezoidal do reservatório.....	58
Figura 24 – Ciclo de carbono - Reações nos reservatórios.	60
Figura 25 – Ciclo de carbono – Interação entre a superfície terrestre e a bacia hidráulica.	61
Figura 26 – Gráfico - Indicador de qualidade: variação de temperatura.	64
Figura 27 – Gráfico - Indicador de qualidade: oxigênio dissolvido.	65
Figura 28 – Gráfico - Indicador de qualidade: pH.	66
Figura 29 – Gráfico - Indicador de qualidade: coliforme fecal.....	67
Figura 30 – Gráfico - Indicador de qualidade: nitratos.	68

Figura 31 – Gráfico - Indicador de qualidade: fosfato.	69
Figura 32 – Gráfico - Indicador de qualidade: demanda bioquímica de oxigênio (DBO).....	70
Figura 33 – Gráfico - Indicador de qualidade: sólidos suspensos.....	71
Figura 34 – Gráfico - Indicador de qualidade: turbidez.	72
Figura 35 – Precipitação anual no país.	73
Figura 36 – Participação das hidrelétricas no total de barragens instaladas.	74
Figura 37 – PDE 2022: evolução da capacidade instalada por fonte.....	75
Figura 38 – Perspectivas de novos reservatórios: caso Belo Monte.....	76
Figura 39 – Estudo energético do médio e alto Tocantins.....	77
Figura 40 – Volumes e elevações operacionais do reservatório.....	78
Figura 41 – Comportamento típico da área alagada de MCH/GCH.....	79
Figura 42 – Comportamento típico da área alagada de PCH.	80
Figura 43 – Zonas distintas do reservatório.	82
Figura 44 – Comportamento do pH em função da profundidade (Estação E5).....	83
Figura 45 – Estrutura do capítulo.	84
Figura 46 – Seção típica do reservatório modelo.	85
Figura 47 – Volume típico do reservatório modelo.	86
Figura 48 – Reservatório: emissões de GEE e perfil vertical.....	87
Figura 49 – Circuito RC: carga e descarga do capacitor.	92
Figura 50 – Modelo elétrico do reservatório.	94
Figura 51 – Dados de entrada e de saída da planilha eletrônica.....	96
Figura 52 – Tela da planilha eletrônica dinâmica desenvolvida em Excel®.....	97
Figura 53 – Área alagada x Volume: Itaipu.	101
Figura 54 – Área alagada x Volume: Tucuruí.	107
Figura 55 – Determinação da equação de tC com GWP-7,6: resultados das interações.	115
Figura 56 — Determinação da equação de tCO ₂ eq com GWP-28: resultados das interações.	116
Figura 57 – Fluxo de gases nos primeiros anos do reservatório.	119
Figura 58 – Período de amortização do capital investido: com e sem a eficiência ecológica.....	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estruturas e equipamentos típicos de centrais hidrelétricas	35
Tabela 2 – Dados básicos da UHE Balbina.....	43
Tabela 3 – Dados básicos da UHE Henry Borden.....	44
Tabela 4 – Dados básicos da UHE Itaipu.....	45
Tabela 5 – Quadro de variação de volume de operação	50
Tabela 6 – Seleção de estudos sobre emissões de reservatórios.....	51
Tabela 7 – Densidade de potência dos reservatórios estudados.	53
Tabela 8 – Emissões equivalentes de tC por reservatórios brasileiros.....	55
Tabela 9 – Fatores de influência nas emissões de reservatórios.....	56
Tabela 10 – Fator de ponderação dos parâmetros de qualidade da água.....	62
Tabela 11 – Parâmetros de regime de operação da usina hidrelétrica.....	89
Tabela 12 – Parâmetros de operação: Itaipu.	99
Tabela 13 – Dimensões do modelo do reservatório de Itaipu.....	100
Tabela 14 – Elevações de jusante e vazões turbinadas: Itaipu.	102
Tabela 15 – Polinômio: temperatura da água.....	102
Tabela 16 – Polinômio: temperatura do ar.	103
Tabela 17 – Polinômio: oxigênio dissolvido.....	103
Tabela 18 – Polinômio: oxigênio saturado.....	103
Tabela 19 – Polinômio: demanda bioquímica de oxigênio.....	103
Tabela 20 – Polinômio: sólidos suspensos.....	104
Tabela 21 – Polinômio: pH.	104
Tabela 22 – Polinômio: fosfato.	104
Tabela 23 – Polinômio: nitrato.....	105
Tabela 24 – Polinômio: turbidez.	105
Tabela 25 – Parâmetros de operação: Tucuruí.	105
Tabela 26 – Dimensões do modelo do reservatório de Tucuruí.	106
Tabela 27 – Elevações de jusante e vazões turbinadas: Tucuruí.....	108
Tabela 28 – Polinômio: temperatura da água.....	109
Tabela 29 – Polinômio: temperatura do ar.	109
Tabela 30 – Polinômio: oxigênio dissolvido.....	109
Tabela 31 – Polinômio: oxigênio saturado.....	109
Tabela 32 – Polinômio: sólidos suspensos.....	110

Tabela 33 – Polinômio: pH.	110
Tabela 34 – Polinômio: fosfato.	110
Tabela 35 – Polinômio: nitrato.	111
Tabela 36 – Comparação das emissões (tC/Ano) – MCT <i>versus</i> Modelo: Cenários 1 e 2.	112
Tabela 37 – Diferenças percentuais com relação às emissões do MCT <i>versus</i> Modelo: Cenários 1 e 2.	112
Tabela 38 – Comparação das emissões (tC/Ano) – MCT <i>versus</i> Modelo: Cenário 3.	113
Tabela 39 – Valores médios obtidos da simulação: tC – GWP 7,6.	114
Tabela 40 – Valores médios obtidos da simulação: tCO _{2eq} – GWP 28.	114
Tabela 41 – Parâmetros de operação: Serra da Mesa.	117
Tabela 42 – Parâmetros de operação: Três Marias.	118
Tabela 43 – Comparação das emissões - Equação: tC.	119
Tabela 44 – Estágios de emissões iniciais de fluxos de gases: polinômios.	120
Tabela 45 – Parâmetros de operação: CH hipotética.	128
Tabela 46 – Valores médios obtidos da simulação: tCO ₂ – GWP 7,6.	129
Tabela 47 – Taxa de emissões iniciais de fluxos de gases nos primeiros dez anos.	130
Tabela 48 – Parâmetros para cálculo do período de amortização do capital investido.	130
Tabela 49 – Parâmetros para cálculo da eficiência ecológica.	131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIE	Agência Internacional de Energia
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CIGB	Comissão Internacional de Grandes Barragens
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GCH	Grande Central Hidrelétrica
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG	<i>Green House Gas</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
HEA	<i>Hydro Equipment Association</i>
IHA	<i>International Hydropower Association</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IQA	Indicador de Qualidade da Água
MCH	Média Central Hidrelétrica
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MME	Ministério de Minas e Energia
MO	Matéria Orgânica
MOS	Matéria Orgânica do Solo
MS	Ministério da Saúde
NA	Nível da Água
NSF	<i>National Sanitation Foundation</i>
ONG	Organização Não Governamental
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PCI	Poder Calorífico Inferior
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
UHE	Usina Hidrelétrica
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
WCD	<i>World Commission on Dams</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área	[m ²]
A _{op}	Tempo de concessão	[meses]
B	Base maior	[m]
b	Base menor	[m]
C	Capacitância	[F]
Ce _{ano}	Emissão de equivalente de tonelada de massa de carbono	[tC]
C _{Ele}	Custo da eletricidade produzida	[US\$/kWh]
CF	Coliformes fecais na água do reservatório	[colônias/100 mL]
C _f	Capacitância fluídica do reservatório	[m ²]
CH ₄	Metano	[-]
C _{Man Ger}	Custo para manutenção do gerador	[US\$/kWh]
C _{Man TH}	Custo para manutenção da turbina	[US\$/kWh]
CO ₂	Dióxido de carbono	[-]
(CO ₂)e	Dióxido de carbono equivalente	[kg (CO ₂)e/kgComb]
C _{Oper}	Custo de operação da usina	[US\$/kWh]
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio na água do reservatório	[mg/L]
E	Elevação a Montante	[m-acima do nível do mar]
E _{Hid}	Energia específica da hidrelétrica	[MJ/kg de Água]
Ep	Eletricidade produzida	[kW]
f	Fator de anuidade	[-]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
h	Altura do reservatório	[m]
H	Queda	[m]
h*	Perda de carga em função da velocidade do escoamento	[mca]
Hop	Número de horas de operação	[h/ano]
h _p	Perda de carga em função da vazão turbinada	[mca]
H _{liq}	Queda líquida da turbina	[m]
I _{GWP}	Índice de potencial de aquecimento global	[-]
I _{OD} (%)	Índice de qualidade da água para oxigênio dissolvido saturado	[-]
I _{pl}	Custo de implantação da usina	[US\$]
I _q	Indicador de qualidade da água	[-]
K	Constante equivalente do circuito hidráulico	[-]
k	Período de amortização do capital investido	[anos]
k*	Coeficiente de perda de carga	[-]
K _p	Constante de perda de carga do circuito hidráulico	[s ² /m ⁵]
L	Comprimento	[m]
mCO ₂	Fluxo mássico de dióxido de carbono	[kg/s]
mH ₂ O	Fluxo mássico de água	[kg/s]
NA	Nível da água	[m-acima do nível do mar]
NO-3	Nitratos na água do reservatório	[mg/L]
OD	Oxigênio dissolvido na água do reservatório	[mg/L]
OD _{sat}	Oxigênio Dissolvido Saturado na água do reservatório	[%]

PCI	Poder calorífico inferior do combustível	[MJ/kgComb]
P _{ele}	Preço da eletricidade no mercado	[US\$/kWh]
pH	Potencial hidrogênio na água do reservatório	[-]
PO ₄	Fosfato na água do reservatório	[mg/L]
q	Fator da taxa de juros “r” ao ano	[%a.a.]
Q	Vazão	[m ³ /s]
q _c	Carga no capacitor	[C]
q _r	Carga do reservatório	[m ³]
Q _{Turb}	Vazão turbinada	[m ³ /s]
R	Receita anual	[US\$]
R ²	Regressão	[-]
R _c	Resistência elétrica de carga	[Ω]
R _d	Resistência elétrica de descarga	[Ω]
R _f	Resistência fluídica	[s/m ²]
SO-42	Sulfatos	[-]
ST	Sólidos totais	[mg/L]
T	Tempo	[d]
tC	Tonelada de massa de carbono	[tC/mês]
tCO _{2eq}	Tonelada de massa de dióxido de carbono equivalente por mês	[tCO _{2eq} /mês]
tCO _{2eq10}	Tonelada de massa de dióxido de carbono equivalente nos primeiros dez anos	[tCO _{2eq} /ano]
tCO _{2eqANO}	Tonelada de massa de dióxido de carbono equivalente por ano	[tCO _{2eq} /ano]
tCO _{2eq-o}	Tonelada de massa de dióxido de carbono equivalente incorporando o enchimento do reservatório	[tCO _{2eq-o} /mês]
td	Tempo de descarga do capacitor	[s]
tr	Tempo de residência	[dias]
UNT	Unidades nefelométricas de turbidez na água do reservatório	[-]
V	Diferença de potencial	[V]
v	Velocidade do escoamento	[m/s]
V _r	Volume do reservatório	[m ³]

SÍMBOLOS GREGOS

ε	Eficiência ecológica	[-]
η _p	Eficiência da planta hidrelétrica	[-]
ΔT	Variação de temperatura na água do reservatório	[° C]
Π _g	Indicador de poluição em termoeletricas	[kg (CO ₂)e/MJ]
π _{gHid}	Indicador de poluição em hidrelétricas	[kg (CO ₂)e/MJ]
φ	Ângulo do talude lateral	[°]

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	19
1.1 MOTIVAÇÃO.....	19
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.3 ESTRUTURA DA TESE	20
1.4 METODOLOGIA.....	21
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E O ESTADO DA ARTE SOBRE EMISSÕES DE GEE NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	23
CAPÍTULO 3 ASPECTOS GERAIS DAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS	34
3.1 COMPONENTES DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS	34
3.2 TURBINAS HIDRÁULICAS	37
3.3 ESTRUTURAS HIDRÁULICAS E SUAS RESPECTIVAS ÁREAS ALAGADAS	39
3.4 CURVA DE PERMANÊNCIA E O ANO TÍPICO	46
CAPÍTULO 4 FATORES QUE INFLUENCIAM NAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DOS RESERVATÓRIOS.....	51
4.1 DENSIDADE DE POTÊNCIA.....	51
4.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DOS RESERVATÓRIOS E OS MODELOS GEOMÉTRICOS	55
4.3 CICLO DE CARBONO E AS REAÇÕES NOS RESERVATÓRIOS.....	59
4.4 QUALIDADE DA ÁGUA NOS RESERVATÓRIOS.....	62
4.4.1 Temperatura	63
4.4.2 Oxigênio Dissolvido.....	64
4.4.3 Potencial Hidrogeniônico.....	65
4.4.4 Coliforme Fecal.....	66
4.4.5 Nitratos.....	67
4.4.6 Fosfato	68
4.4.7 Demanda Bioquímica de Oxigênio	69
4.4.8 Sólidos Suspensos	70
4.4.9 Turbidez	71
CAPÍTULO 5 ASPECTOS DE OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS	73
5.1 PERSPECTIVA DE OPERAÇÃO DOS FUTUROS RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS.....	73
5.2 REGIME DE OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS.....	77
5.3 ÁREA ALAGADA	78
5.4 TEMPO DE RESIDÊNCIA.....	80
5.5 PERFIL VERTICAL DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	81
CAPÍTULO 6 EFICIÊNCIA ECOLÓGICA DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS.....	84
6.1 METODOLOGIA.....	85
6.1.1 Modelo do reservatório	85
6.1.2 Qualidade da água pelo perfil vertical	87
6.1.3 Parâmetros de regime de operação da usina hidrelétrica	88
6.1.4 Carga do reservatório: analogia elétrica.....	91
6.1.5 Equacionamento das Emissões de GEE	94
6.1.6 Programa Computacional (Planilha Eletrônica)	95
6.2 MODELAGEM DOS RESERVATÓRIOS.....	98
6.2.1 Modelagem: reservatório de Itaipu.....	99
6.2.2 Modelagem: reservatório de Tucuruí	105
6.2.3 Resultados das Simulações	111
6.3 EMISSÕES EQUIVALENTES DE GEE.....	114
6.4 EMISSÕES DE GEE INCORPORANDO O ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO	119
6.5 EFICIÊNCIA ECOLÓGICA DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS.....	122
6.5.1 Indicador de Poluição de Centrais Hidrelétricas.....	124

CAPÍTULO 7	ANÁLISE ECONÔMICA INCORPORANDO A EFICIÊNCIA ECOLÓGICA	126
7.1	MÉTODO DE ANÁLISE ECONÔMICA UTILIZADO	126
7.2	PROPOSTA DE ANÁLISE ECONÔMICA	127
7.3	ESTUDO DE CASO DE UMA CENTRAL HIDRELÉTRICA HIPOTÉTICA	128
CONCLUSÕES		133
REFERÊNCIAS		135

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A atividade humana contribui para o aumento das emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE, em inglês GHG – *Green House Gas*). Este tema é de interesse mundial e seu estudo tem por objetivo identificar e promover ações mitigatórias futuras com a finalidade da redução do impacto desses gases no aquecimento global.

Organismos internacionais têm monitorado o crescimento da taxa de emissões de GEE na atmosfera ao longo dos anos. Na pré-revolução industrial, a concentração de CO₂ era de 280 ppm e, em 2010, atingiu 390 ppm (IPCC, 2014).

Tendo como parâmetro os altos níveis de emissão de GEE por parte das usinas termoeletricas, é possível considerar que os reservatórios das usinas hidrelétricas influenciam no aquecimento global ao emitirem dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) em níveis relevantes, pois inundam áreas ricas em matérias orgânicas, como florestas, além de mudarem o comportamento de emissão natural do rio. A produção de gases pela biomassa presente no reservatório ocorre por meio da decomposição aeróbica (produção de CO₂) e anaeróbica (produção de CH₄) (SANTOS et al., 2006).

No Brasil, a geração de eletricidade se baseia principalmente em usinas hidrelétricas e seus reservatórios são importantes para a regularização da bacia e para o armazenamento de volume de água a fim de garantir a produção de energia elétrica em períodos secos (menos chuvosos).

Nesse contexto, é de suma importância desenvolver uma metodologia que avalie o comportamento do reservatório sob a ótica das emissões de GEE e da eficiência ecológica, a qual relaciona, através de um indicador de poluição, a quantidade de poluentes produzida por unidade de energia específica.

Na análise econômica, incorpora-se a eficiência ecológica com a finalidade de impactar o período de amortização do capital investido (*pay-back*) através do aumento do custo de produção de eletricidade.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho de tese é estudar os efeitos da poluição das Centrais Hidrelétricas, buscando o desenvolvimento de um método que considere as emissões de GEE na geração de energia elétrica nesses tipos de usinas.

São objetivos específicos:

- Elaborar uma metodologia para determinar as emissões de poluentes e a eficiência ecológica de centrais hidrelétricas que permita estudar os reservatórios, considerando um modelo geométrico que relacione o comportamento no tempo da série histórica de vazões da bacia, a influência do regime operacional da usina e os parâmetros de qualidade da água;
- Elaborar uma ferramenta computacional baseada em dados de duas importantes usinas hidrelétricas no cenário nacional (Itaipu e Tucuruí) que permita a interação entre as variáveis de interesse e forneça um estado mensal das emissões de CO₂ e CH₄ e suas emissões equivalentes em tC e tCO_{2eq};
- Desenvolver o equacionamento para a determinação das emissões equivalentes em tC e em tCO_{2eq}, com base nos resultados obtidos das simulações dos reservatórios reais;
- Analisar economicamente o impacto no período de amortização do capital investido, incorporando a eficiência ecológica como forma de avaliar o empreendimento sob a ótica ambiental.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

O trabalho está dividido em 8 Capítulos, cuja estrutura é apresentada a seguir:

No Capítulo 1, intitulado “Introdução”, apresenta-se a motivação, os objetivos, a estrutura da tese e a metodologia básica do trabalho.

No Capítulo 2, intitulado “Revisão Bibliográfica e o Estado da Arte sobre Emissões de GEE na Geração de Energia Elétrica”, realiza-se um resumo bibliográfico dos trabalhos relacionados ao tema da tese. Apresenta-se, ainda, uma análise acerca do Estado da Arte.

No Capítulo 3, intitulado “Aspectos Gerais das Centrais Hidrelétricas”, mencionam-se as características dos reservatórios hidrelétricos e seus esquemas básicos de geração de energia, classificados como alta, média e baixa queda.

No Capítulo 4, intitulado “Fatores que influenciam nas emissões de Gases de Efeito Estufa dos Reservatórios”, apresentam-se as emissões das principais usinas hidrelétricas

nacionais e suas relações com a densidade de potência (W/m^2). Identificam-se as reações bioquímicas, as emissões de CO_2 e CH_4 , as características do ciclo de carbono e a qualidade da água em reservatórios.

No Capítulo 5, intitulado “Aspectos de Operação dos Reservatórios”, analisam-se as perspectivas dos futuros reservatórios e as influências do regime de operação com relação à área alagada, ao tempo de residência e ao perfil vertical de qualidade da água.

No Capítulo 6, intitulado “Eficiência Ecológica de Centrais Hidrelétricas”, desenvolve-se a metodologia para determinar a eficiência ecológica da central hidrelétrica, através de um indicador de poluição que se relaciona com a emissão equivalente de tCO_2 . O método consiste em modelar o reservatório com base na figura plana de um trapézio; relacionar os polinômios da qualidade da água pelo perfil vertical; utilizar a analogia elétrica para a carga do reservatório; elaborar uma ferramenta computacional para interagir entre a série histórica de vazões e o regime de operação, obtendo os resultados das emissões de GEE, qualidade da água ($\text{OD}_{\text{Sat}}\%$) e carga do reservatório e, por fim, aplicar o método matemático da eliminação de Gauss para determinar o equacionamento da emissão equivalente de tCO_2 .

No Capítulo 7, intitulado “Análise Econômica incorporando a Eficiência Ecológica”, vincula-se a eficiência ecológica ao cálculo do custo de produção da eletricidade e analisa-se o tempo de retorno do capital investido para uma central hidrelétrica hipotética, com e sem a eficiência ecológica. Consideram-se dois cenários de emissões com diferentes índices de aquecimento global (GWP) para o metano: GWP igual a 7,6 vezes e GWP igual a 28 vezes.

No Capítulo 8, apresentam-se as Conclusões da tese e as sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

1.4 METODOLOGIA

Propõe-se como metodologia para desenvolvimento deste trabalho a determinação da eficiência ecológica com base no Indicador de Poluição, o qual é relacionado a uma equação de dióxido de carbono equivalente. A equação é obtida através da utilização de uma modelagem de reservatório, seguindo as seguintes etapas.

Figura 1 – Metodologia básica



Fonte: Elaborada pelo autor.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E O ESTADO DA ARTE SOBRE EMISSÕES DE GEE NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Desde o início da década de 90, foram desenvolvidas numerosas pesquisas relacionadas às emissões de GEE em reservatórios, reconhecendo as hidrelétricas como fontes emissoras. Com as informações obtidas em medições de CO₂ e CH₄ realizadas em reservatórios, através de práticas que utilizem a instrumentação adequada, os autores apresentam formulações que auxiliam na determinação dos gases poluentes. Percebe-se que as plantas termoeletricas são bases comparativas na avaliação do potencial das usinas hidrelétricas como fontes emissoras e que, principalmente, estas são vistas como empreendimentos emissores de GEE.

O Painel Intergovernamental Sobre a Mudança do Clima (IPCC, 1990) disponibilizou um relatório científico sobre as mudanças climáticas e abordou o conceito do Potencial de Aquecimento Global (do inglês *Global Warming Potential* – GWP), o qual considera os diferentes tempos em que os gases permanecem na atmosfera. O indicador define o efeito do aquecimento integrado no tempo devido a uma emissão instantânea por unidade de massa de um determinado GEE na atmosfera, relacionando-o ao dióxido de carbono. Nesse relatório, o metano possuía um potencial de aquecimento global equivalente a 21 vezes o potencial do dióxido de carbono no horizonte de tempo igual a 100 anos; quando observado no horizonte de 20 anos, o potencial aumenta em 63 vezes. Ressaltam-se as diferenças no tempo de vida: no caso do CO₂, o tempo de vida é de 50 a 200 anos e, do CH₄, é de 10 anos. O índice GWP é atualizado ao longo dos anos através da divulgação de relatórios e o metano iniciou com a equivalência ao CO₂ de 21 vezes em 1990, 21 vezes em 1996, 25 vezes em 2007 e 28 vezes em 2014.

Rudd et al. (1993) consideram que as emissões de GEE em reservatórios hidrelétricos podem ser significativas quando comparadas às emissões de plantas térmicas a combustível fóssil. Os GEE (CO₂ e CH₄) são produzidos durante o processo de decomposição da biomassa no interior do reservatório e a quantidade emitida está relacionada à área alagada.

Rosa e Schaeffer (1995) propõem o indicador de potencial de aquecimento global para comparar quantitativamente os efeitos das emissões de diferentes gases. A hidroeletricidade contribui menos para o aquecimento global do que a geração de combustível fóssil, quando avaliadas em longo prazo. A maioria das emissões de CH₄ de reservatórios hidrelétricos está concentrada em um período de tempo e diminui durante os primeiros anos, enquanto a

emissão de CO₂ por geração a combustível fóssil permanece contínua durante toda a vida útil do investimento do capital.

Fearnside (1997) indica que o impacto das emissões de CO₂ e CH₄ em reservatórios de usinas hidrelétricas nas áreas de floresta tropical deveria ser calculado e comparado com alternativas de energia que contribuam com o aquecimento global, tais como, o combustível fóssil. O trabalho do pesquisador relaciona a usina de Tucuruí como base para esclarecer as diferenças entre as fontes geradoras, a qual produziu emissões significativas de GEE, sendo, contudo, menor em comparação à geração por combustível fóssil no horizonte de 100 anos. Definiu-se a forma de avaliação por tipo de geração (hidráulica ou térmica) através do impacto na atratividade da hidrelétrica pela taxa de desconto do investimento com base no efeito do tempo de preferência. O tempo de preferência é a taxa de desconto na emissão de GEE e/ou seus impactos sob a aplicação indireta na taxa de juros do investimento, chamada pelo autor de taxa de atratividade. Quando a usina hidrelétrica é ponderada pela emissão e pelos impactos minoritários em relação à termoeletrica, a taxa de juros no financiamento se torna atraente, de tal forma que viabiliza o empreendimento em tempo que justifique o risco do investimento. Além disso, o período entre o início das obras até a operação comercial (início das receitas) é maior que nas instalações das térmicas.

Cardu e Baica (1999) estabelecem o conceito de Dióxido de Carbono Equivalente [(CO₂)eq] baseando-se na concentração máxima permitida para o CO₂ na atmosfera. Para quantificar o impacto ambiental, os autores propõem um indicador, caracterizado como a razão entre o Dióxido de Carbono Equivalente do combustível e seu Poder Calorífico Inferior (PCI), ao qual se deu o nome de “Indicador de Poluição”. Relacionando o dióxido de carbono emitido pelo processo de combustão com seu poder calorífico, foram possíveis as comparações entre combustíveis heterogêneos. Porém, um combustível pode possuir um poder calorífico alto e emitir uma grande quantidade de poluentes na atmosfera, ou ter a emissão de gases nocivos desprezível ou nula, mas não possuir a energia desejada para se obter uma boa eficiência no processo produtivo. Partindo-se da hipótese de que o melhor combustível é aquele que possui o menor Indicador de Poluição, foi proposto um indicador mais complexo e adimensional, que expressasse o impacto ecológico dos componentes dos gases nocivos emitidos na atmosfera após a queima de um combustível em relação à energia útil produzida por usinas termelétricas.

Jørgensen (1999) relata dois grandes problemas na modelagem ecológica: (i) como obter parâmetros confiáveis e (ii) como construir propriedades do ecossistema em modelos. O autor apresenta o estado da arte do modelamento ecológico com ênfase no desenvolvimento

de modelos dinâmicos e relata problemas, sendo os principais deles: (i) não havia dados suficientes para desenvolver modelos que pudessem fornecer prognósticos confiáveis, (ii) a estimativa de parâmetros era o ponto mais fraco da modelagem e (iii) os modelos não refletiam as propriedades reais dos ecossistemas, particularmente a sua adaptabilidade e a capacidade de atender às mudanças nas funções, forçando a modificação na composição de espécies, tais como, modelos *Fuzzy*, inteligência artificial, banco de dados de parâmetros ecológicos, desenvolvimento de modelo estrutural dinâmico e uso das teorias do caos e da catástrofe. Várias pesquisas são propostas para resolver esses problemas e conclui-se que os ecossistemas possuem muitas diferenças no aspecto físico, principalmente devidas às suas enormes adaptabilidades.

St. Louis et al. (2000) demonstram que os reservatórios são fontes de GEE para a atmosfera e que suas áreas alagadas têm aumentado ao ponto em que elas deveriam ser incluídas em inventários globais de emissões antrópicas de gases de efeito estufa. Os autores esclarecem que a determinação do efeito global de todos os tipos de reservatórios sobre a atmosfera requer duas partes gerais de informação: medições do fluxo de reservatórios, o qual varia em quantidade de carbono orgânico inundada, idade do reservatório e distribuição global; e a área de superfície de todos os reservatórios em nível mundial. As medições realizadas utilizaram câmaras flutuantes e/ou o método camada limite na coleta dos gases em fluxos de difusão e de ebulição.

A Comissão Mundial de Barragens (WCD, 2000) disponibilizou um relatório que contempla os aspectos dos reservatórios e seus impactos e expõe mundialmente a contribuição desses nas emissões de GEE, reforçando a importância dos mesmos nas áreas da regularização do rio, pesca, energia, dentre outros. A natureza dos impactos das grandes barragens sobre os ecossistemas era geralmente bem conhecida pelos cientistas, ONGs e grupos profissionais, tais como a Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB), Associação Internacional de Hidrelétricas (IHA) e a Agência Internacional de Energia (AIE), os quais têm escrito extensivamente sobre os reservatórios. Os impactos no ecossistema foram classificados de acordo com as seguintes categorias: (i) impactos de primeira ordem, os quais envolvem consequências físicas, químicas e geomorfológicas de bloqueio de um rio, alterando a distribuição natural e o regime de vazões; (ii) impactos de segunda ordem, que abrangem mudanças na produtividade biológica primária dos ecossistemas, incluindo os efeitos sobre ribeirinha e ripícola planta-vida e no habitat a jusante, tais como zonas úmidas; ou (iii) impactos de terceira ordem, os quais incluem alterações na fauna (como peixes) causadas por

um efeito de primeira-ordem (como a migração de bloqueio), ou por um efeito de segunda ordem (como a diminuição na disponibilidade de plâncton).

A Associação de Equipamentos de Usinas Hidrelétricas (HEA, 2001), mencionou sua contribuição inicial dentro do IHA desde 2001 (ano de fundação) como associação dos fabricantes de equipamentos voltados para hidrelétricas e apresentou a importância do desenvolvimento de equipamentos que sejam mais eficientes e com menor impacto ambiental. Além disso, visou atender às soluções que modernizassem as hidrelétricas existentes e que integrassem plantas menores na rede. A associação é composta pelos principais fabricantes mundiais, tais como ALSTOM, VOITH, IMPSA e ANDRITZ.

Fearnside (2004), em relação à controvérsia dos reservatórios de hidrelétricas serem considerados fontes de energia limpa, expôs que a coluna d'água contém metano em níveis que podem atingir a entrada da tomada d'água para as turbinas e para os vertedouros. Os reservatórios se tornam fábrica de metano com a alteração na elevação da coluna d'água e alagamento de grandes áreas através da inundação de terras ao seu redor, na zona litorânea. Quanto maior a profundidade, maior é a concentração de metano.

Rosa et al. (2004) realizaram pesquisa de campo através de medições nas principais usinas do país e referiram-se às emissões de GEE de reservatórios hidrelétricos em regiões tropicais. Os casos estudados no Brasil, entre o período de 1992 a 2002, foram: Tucuruí (PA), Balbina (AM), Samuel (AM), Curuá-Una (AM), Serra da Mesa (MG), Itaipu (SC), Miranda (MG), Três Marias (MG), Barra Bonita (SP), Segredo (PR), Xingó (AL/SE) e Samuel (RO). Os autores indicam que as emissões de GEE pelas turbinas hidráulicas quando tomada a água na região da estrutura de adução, localizada na parte mais profunda do reservatório, em que a concentração de metano é maior. Com relação às emissões a jusante da usina hidrelétrica, afirmam que o impacto da emissão do metano por unidade de área é muito menor quando comparado com a do reservatório (milhar). Destacou-se uma importante observação com relação à baixa relação com as emissões e a idade do reservatório, possivelmente pela decomposição não ser somente pela biomassa existente no reservatório, mas, também, pela arrasto da matéria orgânica de bacias de drenagens a montante. Em termos gerais, sugeriram que o risco de emissões de GEE pode ser reduzido se evitada uma baixa relação da densidade de potência (W/m^2), sendo essa razão da potência instalada da usina com a área alagada pelo reservatório, na ordem de $0,1 W/m^2$, juntamente com a realização da limpeza prévia da biomassa na região a ser alagada.

Fearnside (2005) compara as emissões de GEE da barragem da hidrelétrica de Curuá-Una com as emissões que seriam liberadas se a mesma geração de eletricidade fosse feita por

usinas termoeletricas. A usina apresentava uma grande área de deplecionamento, ou seja, a variação sazonal do nível da água (entre a máxima e a mínima elevação) representa 6 metros. Em Itaipu, por comparação, essa variação é de 20 a 40 centímetros. Dessa forma, as grandes áreas expostas no período seco se tornariam fonte de matéria vegetal verde para zonas anóxicas (sem oxigênio) quando do alagamento destas áreas em períodos chuvosos. O trabalho conclui que o impacto de Curuá-Una, em relação a uma mesma quantidade gerada em térmica é 3,7 vezes maior.

Santos et al. (2006) apresentam resultados de medições de CO₂ e CH₄ em vários reservatórios brasileiros e comparam com as emissões de termoeletricas hipotéticas de mesma potência. A “emissão bruta de GEE” é aquela que não exclui a emissão no pré-reservatório, ou seja, emissões naturais desses gases da própria bacia antes da construção da barragem. Apesar das medições de gases serem consideradas como “emissões brutas”, as hidrelétricas apresentaram melhores resultados na maioria dos casos estudados. As usinas estudadas foram: Miranda, Barra Bonita, Segredo, Três Marias, Xingó e Tucuruí. Dados adicionais referentes aos reservatórios das hidrelétricas de Itaipu e Serra da Mesa foram obtidos e indicados no trabalho em questão. Dependendo do tipo da tecnologia, as eficiências de uma planta térmica a ciclo combinado ou simples eram de 30% e 50%, respectivamente. Conclui-se que as hidrelétricas que superaram nas emissões em relação às térmicas foram: Samuel, Serra da Mesa e Barra Bonita. Xingó obteve desempenho inferior quando comparada à tecnologia de ciclo combinado a gás. Tucuruí obteve desempenho superior em todas as tecnologias, exceto para ciclo combinado a gás, no qual se verificou a mesma quantidade de emissão de tC.

Ferreira et al. (2006) demonstram que a construção e a operação de usinas hidrelétricas geram inúmeros impactos ambientais, alguns deles denominados externalidades negativas, cujos custos não são repassados aos consumidores e são pagos pela sociedade. Os projetos cotejados pelo setor elétrico contemplam a análise das emissões de GEE. Uma forma de mitigação é a retirada da vegetação das áreas a serem submersas, sendo esse processo raramente efetuado devido aos custos adicionais envolvidos. O trabalho apresenta custos para as externalidades negativas com base em emissões de oito reservatórios de Minas Gerais: Três Marias, Nova Ponte, Camargos, Emborcação, Miranda, Salto Grande, Itutinga e Piau. O cálculo foi realizado pelo produto do preço estimado da tonelada de massa de carbono de 5 dólares (o preço estimado pelo Banco Mundial era de 5 a 15 dólares) com a emissão de tCO₂ equivalente, utilizando um potencial de aquecimento global para o metano de 20,1 vezes em relação ao CO₂. Em sequência, realizaram um comparativo do impacto do custo de externalidades pela geração com o preço da tarifa de energia elétrica, todos em R\$/MWh. O

resultado maior foi em Três Marias, em que o custo de externalidades representou 35% do custo da tarifa, porque a razão da produção de GEE pelo MWh gerado foi a maior dentre os oito reservatórios.

Villela e Silveira (2007) utilizam o conceito de eficiência ecológica em plantas termoelétricas como sendo um número que permite avaliar o impacto ambiental das emissões gasosas de um sistema mediante uma comparação entre emissões de poluentes integrados hipoteticamente (emissões equivalentes de CO₂) com os padrões existentes de qualidade do ar. Eles determinaram a eficiência ecológica em duas plantas térmicas de tecnologias diferentes, gás natural e diesel, e verificaram que a planta termoelétrica a gás possui uma eficiência de 94,4%, enquanto a planta diesel alcançou 91,4%, resultando a última tecnologia como a menos atrativa sob a ótica do impacto ambiental.

O Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2006b) preparou o primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa em reservatórios nacionais, relatando as emissões de CO₂ e CH₄ pelos reservatórios de importantes usinas hidrelétricas e relacionando uma avaliação através de comparativos com diversas tecnologias de plantas termoelétricas equivalentes. Os resultados e os reservatórios estudados foram os mesmos apresentados por Santos (2006). O inventário concluiu que a energia hidrelétrica não é uma fonte isenta de emissões atmosféricas e as emissões de CO₂ e CH₄ são de origens biogênicas. As emissões são variantes no tempo e podem alterar de acordo com a profundidade e com a distribuição da biomassa submersa. Ainda de acordo com o inventário, há um provável aumento brusco nas emissões logo após a submersão e, posteriormente, estas seguem com uma taxa desconhecida. As hidrelétricas foram comparadas com as alternativas de geração térmicas e os resultados foram melhores na maioria dos casos estudados, o que as reforçou como uma solução de geração viável para minimizar os efeitos do aquecimento global. O risco pode ser reduzido quando utilizada uma baixa relação de densidade de potência com a área alagada (W/m²) e desmatando-se o reservatório antes da inundação.

Santos et al. (2008) apresentam os efeitos e as variáveis nas emissões de gases de efeito estufa por reservatórios de hidrelétricas. Foram analisadas questões relacionadas às emissões a jusante do reservatório, à extrapolação de um dado para outra área do reservatório e de um reservatório para outro, ao comportamento das emissões no tempo, às emissões líquidas *versus* emissões brutas e a origem da matéria orgânica. Em resumo, destacam que: (i) a emissão a jusante de metano é influenciada pela vazão de água que passa pela turbina, tomada na região de água profunda do reservatório, em que a concentração de CH₄ é maior; (ii) a recomendação do uso de extrapolação por faixas de profundidade (de forma ponderada)

com o emprego de um modelo geométrico ou de um modelo matemático polinomial do tipo elevação *versus* área ou, em melhor caso, o uso de um modelo digital de dados batimétricos. Com relação à extrapolação entre diferentes reservatórios, um dos maiores desafios era obter um valor de emissões para cada um deles e para um conjunto de todos os existentes; (iii) de acordo com experiências empíricas existiam duas fases distintas nas emissões de GEE nos reservatórios hidrelétricos: o primeiro estágio referia-se ao enchimento até seus primeiros anos de existência (3 a 5 anos), em que as emissões atingem seus altos valores e, no segundo estágio, as emissões alcançam o regime permanente, sendo que as principais fontes dos gases são as biomassas formadas no próprio reservatório, as que chegam pelo afluente com a contribuição ao longo da bacia e uma pequena parcela da biomassa residual; (iv) as emissões brutas eram aquelas que não descontavam as emissões naturais anteriores à construção do reservatório e, quando descontadas, passaram a ser líquidas; (v) a fonte de matéria orgânica podia ser a biomassa inundada pré-existente, carbono orgânico dissolvido e particulado trazido da área terrestre circunvizinha (escoamento superficial, água subterrânea, chuva) e a biomassa gerada dentro do reservatório (produção primária). Os pesquisadores concluíram que a variação das emissões dos gases inter e intra-reservatórios pode ser atribuída a distintos regimes de circulação de águas, os quais proporcionam condições diferenciadas de qualidade de água e geração de matéria orgânica. Notou-se que o regime operacional também pode influenciar nas emissões de gases quando o reservatório depleciona de maneira rápida, expondo os braços e/ou áreas mais rasas ao crescimento de vegetações que, ao serem inundadas, dão origem a intensa metanogênese e, conseqüentemente, emitem GEE.

Fearnside (2008) recomenda calcular as emissões de GEE de barragens hidrelétricas como meio de tomada de decisão em investimentos públicos em várias opções para geração de energia elétrica. Ao contabilizar as emissões de um reservatório, seria necessário excluir as já existentes na água do rio sem a construção da barragem. À época do estudo, existiam poucas medidas diretas e o método de aproximação mais utilizado naquele momento era a extrapolação; a vantagem era a de não requerer nenhuma informação detalhada sobre as características de cada reservatório. O autor esclarece que um método exigente inclui uma série de cálculos baseados no perfil de concentração de metano, ciclos sazonais em concentração, profundidade das turbinas e vertedouros, juntamente com os níveis de água do reservatório, as posições da tomada d'água (turbinas) e do vertedouro (comportas), com os respectivos fluxos de água nessas estruturas. O enchimento provoca altas emissões nos primeiros anos, devido ao CH₄ gerado pela decomposição da biomassa herbácea inundada, bem como ao CO₂, originado pela decomposição da parte acima d'água das árvores da

floresta mantidas na região do reservatório. Passada a fase dos primeiros anos, as emissões permanentes ficam por conta da vegetação exposta no deplecionamento do reservatório e de macrófitas. Realizou-se uma analogia do efeito da baixa pressão na tomada de água pela turbina com a abertura de uma garrafa de refrigerante, apresentando o efeito da solubilidade do gás através da Lei de Henry, ou seja, quando a água emergir das turbinas, a pressão cai imediatamente, liberando os gases dissolvidos. A facilidade com que o gás sai da solução é determinada pela constante da Lei de Henry: no caso do CH_4 esta constante é maior do que no caso do CO_2 , fazendo com que as bolhas de metano sejam desprendidas com maior facilidade.

A Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO, 2008) disponibilizou um relatório sobre o *status* das emissões de GEE (CO_2 e CH_4) de reservatórios com o apoio de um grupo de trabalho internacional e multidisciplinar. Nesse relatório, destaca-se a importância dos reservatórios no controle de vazões e seu multiuso, tais como o abastecimento de água, irrigação, mitigação de enchentes, proteção contra o efeito da seca, navegação e geração de energia. Indica-se que a emissão de metano está em função do tipo e da densidade da biomassa alagada, do crescimento de macrófitas aquáticas, da velocidade do vento, da temperatura, da saturação do oxigênio e do nível da água. Os fatores que poderiam direcionar as emissões de GEE são as temperaturas da água e do ar, pluviosidade ou os parâmetros-chaves, sendo esses, o conteúdo de oxigênio dissolvido, a carga de carbono, tempo de residência ou produção primária.

Jørgensen (2008) realiza um trabalho de visão geral dos tipos de modelos disponíveis para desenvolvimento de modelagem ecológica através de um levantamento estático de modelos apresentados em trabalhos científicos nos seguintes períodos: (i) 1975-1982: modelos estocásticos, modelos de distribuição espacial e modelos estruturalmente dinâmicos, modelos baseados na utilização de estatísticas, modelos *Fuzzy*, modelos usando teoria da catástrofe, modelos dinâmicos da população e modelos biogeoquímicos; (ii) 2000-2006: modelos estocásticos, modelos estruturalmente dinâmicos, modelos estatísticos, modelos *Fuzzy*, modelos baseados no uso da teoria da catástrofe, modelos dinâmicos da população, modelos biogeoquímicos, modelos de distribuição espacial, modelos baseados no indivíduo, modelos de redes neurais artificiais, modelos desenvolvidos pelo uso da inteligência artificial, modelos que usam a teoria do caos e modelos estáticos. Com predominância no primeiro período do modelo biogeoquímico, seguido pelo tipo de dinâmica da população, e no segundo período ainda liderado pelo biogeoquímico, e na sequência os tipos dinâmica da população e distribuição espacial. Cada modelo apresentou suas vantagens e desvantagens, destacando-se a necessidade de informações disponíveis e/ou grandes banco de dados, ou seja, modelos

estatísticos tinham a vantagem de não exigir um banco de dados sofisticado, ao contrário de todos os outros modelos apresentados, que precisavam de várias informações para as interações dentro dos elementos internos aos próprios modelos.

A Associação Internacional de Usinas Hidrelétricas (IHA, 2010), elaborou dois documentos, sendo um para avaliação de sustentabilidade da usina hidrelétrica e outro para guiar as medições de GEE de reservatórios. O primeiro documento foi direcionado para as diversas questões envolvidas na avaliação dos impactos sob a ótica do planejamento do reservatório, qualidade da água, regime de fluxos a jusante, biodiversidade, erosão e sedimentação, preparação e enchimento do reservatório, dentre outros. Cada questão foi avaliada por uma pontuação entre 1 (mínimo) a 5 (máximo), sendo o mínimo uma pontuação em que o reservatório não cumpre os requisitos ou possui lacunas que indicam a existência de impactos negativos na avaliação do mesmo e o máximo atende os requisitos abordados no guia. Por exemplo, no que tange ao planejamento e ao enchimento do reservatório, levantaram-se questões sobre o atendimento das boas práticas e do gerenciamento aos requisitos de construção, de meio ambiente e de aspectos sociais. Cada resultado relacionado ao tema permite avaliar a pontuação média final do empreendimento e qualificá-lo como sustentável ou não. O segundo documento foi dividido em três partes principais: (i) conceitos e processos: apresentaram-se os assuntos relativos às emissões e às variáveis do processo, tais como os parâmetros chave que podem predizer a emissão dos GEE ou a vulnerabilidade para elevadas emissões, sendo esses a concentração de oxigênio dissolvido, a temperatura da água, o estoque de matéria orgânica, a fonte de nutrientes, a luz, a biomassa (plantas, algas, bactérias e animais, etc), os sedimentos, a estratificação do corpo do reservatório, a velocidade e a direção do vento, a área alagada, a pluviosidade, as velocidades de corrente de água, as profundidades, as reduções nas pressões hidrostáticas (quando a água é tomada em baixas profundidades) e o aumento da turbulência a jusante do reservatório associadas com as estruturas auxiliares (vertedouro); (ii) manual de campo: incluiu instruções de como conduzir as medições de GEE nos ecossistemas terrestre e aquático. Analisaram-se os equipamentos de medições, tais como, a câmara flutuante (emissões de superfície) e o funil (emissão por bolhas); (iii) manual de cálculo: incluem equações de suporte às medidas obtidas em campo e metodologia para extrapolação de dados.

Siqueira e Silveira (2010) analisam a eficiência energética com a utilização das vazões mínimas da curva de permanência juntamente com a avaliação econômica do investimento. O empreendimento é dimensionado para atender uma série de vazões através de duas unidades geradoras, porém, quando utilizadas as vazões mínimas do projeto para dimensionar a terceira

unidade geradora, a energia produzida aumenta, juntamente com o custo e com o período de amortização do capital investido.

Siqueira e Silveira (2011) realizam a análise da eficiência ecológica considerando um modelo de reservatório hipotético trapezoidal. A emissão média de tCO_{2eq} foi obtida através de um modelo de volume e seção de uma Figura plana trapezoidal. Aplicou-se o efeito da série histórica de vazões mensais do empreendimento e as emissões de CO_2 e CH_4 mensais foram determinadas segundo o comportamento da área alagada, juntamente com os limites operacionais da hidrelétrica. Com base no indicador de poluição e eficiência da usina, determinou-se a eficiência ecológica do projeto. Economicamente, certificou-se o impacto no período de amortização do capital investido (*pay-back*) sob dois cenários: com e sem aplicação da eficiência ecológica.

Mäkinen e Khan (2010) abordam considerações políticas sobre as emissões de GEE pelos reservatórios, afirmando que a distância entre um impacto global sobre o clima e a necessidade de medidas de mitigação local enseja a busca por mecanismos apropriados para combater essas emissões. Eles mencionam que a demanda sociopolítica é chave para a construção de barragens. A restrição de projetos hidrelétricos com base no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) se baseia no relatório da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) de 2006. Para identificar as hidrelétricas como potenciais emissoras de GEE, o MDL realizou verificação pela densidade de potência, a qual é a razão da potência instalada da usina com sua respectiva área alagada (W/m^2). Isto significa que um baixo valor para a densidade de potência indica que a usina hidrelétrica precisa de uma grande área alagada para produzir energia elétrica. O oposto é o desejado, ou seja, quanto maior a densidade de potência menor será área a ser alagada para produção de eletricidade. Os mesmos autores expõem que projetos em que a densidade de potência está na razão inferior a $4 W/m^2$ devem ser desconsiderados do ambiente de MDL, ao contrário dos que possuem valores superiores a $10 W/m^2$, estando esses dentro do MDL e caracterizados como projetos com emissões de GEE a serem desprezadas. Quando a densidade estiver compreendida entre 4 e $10 W/m^2$, o projeto deve ser caracterizado dentro de uma emissão de $90 gCO_{2-eq}/kWh$.

A IHA (2012) disponibilizou uma ferramenta, na versão beta, norteadá pelo próprio guia emitido em 2010 (IHA, 2010). Nessa ferramenta foram apresentados os três modelos empíricos de reservatórios com as seções típicas denominadas de U, V e Y e as superfícies de área alagada nos formatos 1 (oval), 2 (circular) e 3 (irregular). As emissões são relacionadas com a idade do reservatório, a temperatura, a precipitação anual e as áreas inundadas pela sazonalidade do reservatório.

Kumar e Sharma (2014) mencionam o impacto da qualidade da água sobre as emissões de reservatórios hidrelétricos e apontaram que, de acordo com a mudança climática, as emissões de gases de efeito estufa (GEE), como CO_2 e CH_4 , a partir de reservatórios artificiais, especialmente em regiões tropicais, estão resultando no aquecimento global. O CO_2 e CH_4 em reservatórios hidrelétricos são produzidos devido à decomposição da matéria orgânica na parte inferior. Com a finalidade de encontrar a relação entre as emissões de CO_2 e CH_4 com a qualidade da água, 10 parâmetros de qualidade da água foram avaliados. Segundo os autores, a análise indicou que as emissões de CO_2 dos reservatórios Indianos estudados foram, principalmente, em função do pH, alcalinidade e OD. As emissões de CH_4 não foram encontradas, devido à natureza superficial do reservatório.

Conclui-se que o tema é amplamente discutido por diversos setores e há consenso entre os pesquisadores e cientistas de que as emissões de GEE pelos reservatórios são atuais e devem ser cada vez mais trabalhadas com o propósito de encontrar um denominador comum que auxilie na determinação dos gases, seja pelo aumento de campanhas de medições em campo, buscando fortalecer as equações empíricas, ou por modelos e teorias que relacionem as reações e a interdependência dos componentes que atuam na usina hidrelétrica.

Constata-se que o estado da arte para medições em campo considera tipos de instrumentos, os quais, na maioria dos casos, são equipamentos típicos, como o da câmara flutuante na coleta dos gases do processo de difusão (água-ar) e do funil na coleta dos gases emitidos por bolhas (água-sedimento). Com relação ao modelo, este pode ser de vários tipos, dependendo da condição de contorno, do número de dados de entrada e de saída e do tamanho do banco de dados. Nesse trabalho, considera-se o modelo estático, utilizando uma ferramenta de *Software* (Excel®), com variações mensais correspondentes às quantidades de meses da série histórica de vazões e verifica-se o comportamento das emissões de GEE ao longo do período em função do regime operacional da usina hidrelétrica.

CAPÍTULO 3 ASPECTOS GERAIS DAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

As centrais hidrelétricas cumprem papel dominante na geração de energia elétrica dentro da matriz energética brasileira, alcançando, em 2012, uma participação em torno de 75% do total de potência instalada no Brasil. Porém, o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE-2022) do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2013b) propõe a redução da participação das hidrelétricas para 68,8% e um maior destaque à energia eólica no complemento da matriz energética, assumindo 9,5%, contra uma discreta participação de 1,5% em 2012. A maior parte do potencial hídrico nacional a ser explorado está na Região Amazônica.

Sabendo-se da importância da diversificação e da integração de tecnologias na geração de energia elétrica dentro da matriz, aliada a uma produção ambientalmente correta, torna-se necessário verificar os empreendimentos no contexto da responsabilidade dos impactos causados ao meio ambiente. Setores governamentais, privados e pesquisadores têm buscado desenvolver uma metodologia com a finalidade de identificar os tipos de fontes geradoras, que minimizem a contribuição negativa referente às emissões de poluentes.

Atualmente, fontes que emitem GEE têm sido evitadas ou têm a participação reduzida na matriz energética, a fim de diminuir os efeitos do aquecimento global. Sabe-se que as hidrelétricas contribuem com as emissões de gases de efeito estufa, especialmente o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄). Estudos foram realizados em diversos reservatórios de usinas hidrelétricas brasileiras obtendo resultados empíricos, porém, existe a necessidade de encontrar uma metodologia que determine, de modo geral, as emissões pelas hidrelétricas.

Sendo assim, torna-se essencial entender os aspectos gerais inerentes às usinas hidrelétricas, para relacionar as estruturas hidráulicas ao tipo de tecnologia, de baixa, média e alta queda.

3.1 COMPONENTES DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Tipicamente, as estruturas e os equipamentos relacionados às centrais hidrelétricas são classificados em civis, mecânicos, elétricos e de transmissão, conforme Tabela 1.

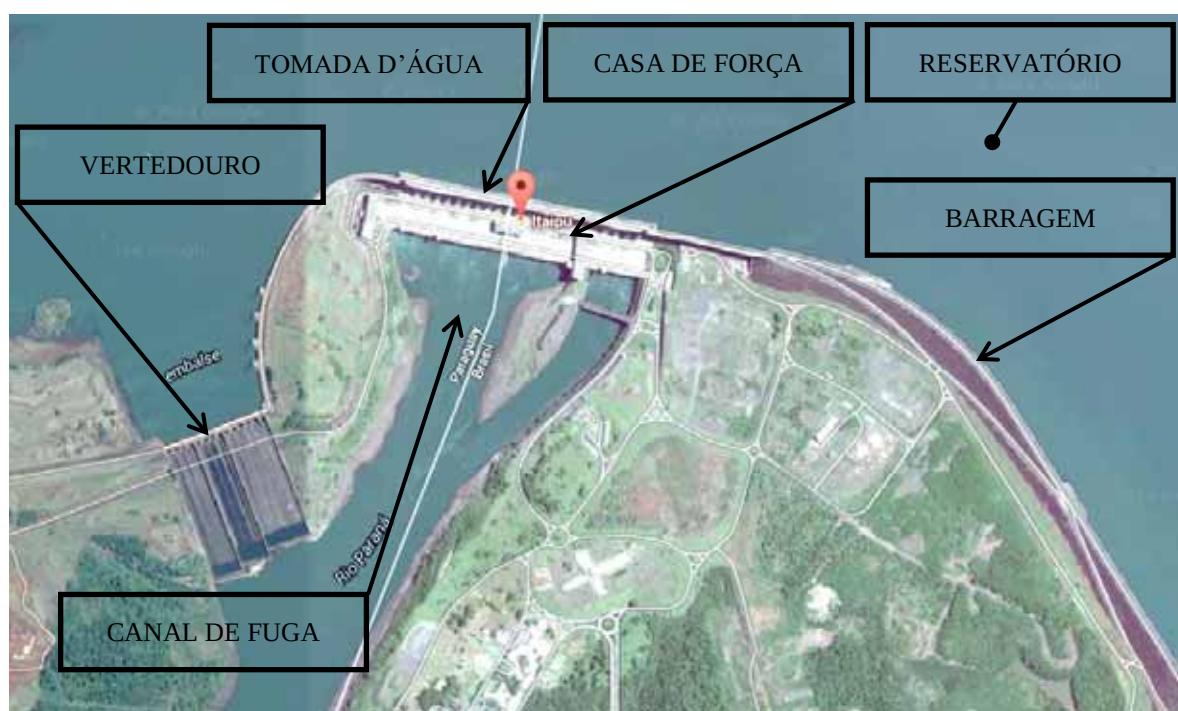
Tabela 1 – Estruturas e equipamentos típicos de centrais hidrelétricas

Equipamentos civis	Equipamentos Mecânicos	Equipamentos Elétricos	Transmissão
Barragem	Turbinas hidráulicas	Geradores elétricos	Subestação elevatória
Vertedouro	Válvulas	Equipamentos de média tensão	Linha de transmissão
Tomada D'água	Comportas	Serviços auxiliares elétricos	Subestação abaixadora ou coletora
Órgãos adutores de água e tubulação forçada	Ponte rolante	Sistema de supervisão, controle e proteção	
Câmara de carga e chaminé de equilíbrio	Serviços Auxiliares Mecânicos		
Casa de Força			

Fonte: Elaborada pelo autor.

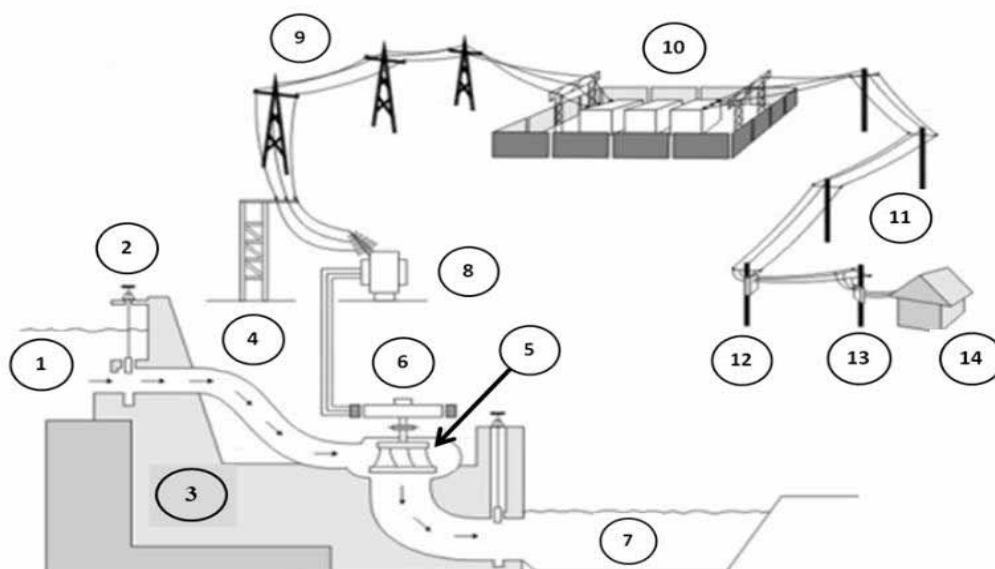
A Figura 2 mostra o arranjo típico em planta de uma central hidrelétrica após a construção da barragem, juntamente com as estruturas auxiliares (vertedouro e tomada d'água). O corte típico da hidrelétrica e a conexão com o sistema externo até o consumidor são apresentados na Figura 3.

Figura 2 – Arranjo geral em planta de uma usina hidrelétrica



Fonte: Adaptado foto GOOGLE MAPS (2015)

Figura 3 – Arranjo geral em corte de uma usina hidrelétrica



Fonte: Adaptado de FURNAS (2013a)

onde:

- 1- Reservatório;
- 2- Comporta da tomada d'água;
- 3- Barragem;
- 4- Conduto forçado (tubulação de alta pressão);
- 5- Turbina hidráulica;
- 6- Gerador elétrico;
- 7- Canal de fuga;
- 8- Transformador elevador;
- 9- Linha de transmissão;
- 10- Subestação abaixadora;
- 11- Rede de distribuição;
- 12- Transformador abaixador;
- 13- Medidor;
- 14- Consumidor.

Em síntese, produz-se energia elétrica a partir do armazenamento do volume de água no reservatório, que, em seguida, é conduzido pelos circuitos hidráulicos de adução (tomada d'água, tubulação de baixa e alta pressão) até as turbinas hidráulicas que transformam as energias de pressão e cinética em energia mecânica no eixo da turbina. As turbinas estão

acopladas aos geradores elétricos que, por sua vez, convertem a energia mecânica em energia elétrica, a qual será transmitida à rede de transmissão do sistema elétrico, passando pelos transformadores elevadores, subestação elevatória, linha de transmissão, subestação abaixadora, rede de distribuição, transformador abaixador, medidor e consumidor.

Os demais sistemas associados (equipamentos mecânicos e elétricos) possuem a função de auxiliar e de proteger os principais equipamentos de produção (turbina, gerador, transformador, etc.) e de conexão da planta hidrelétrica ao sistema elétrico.

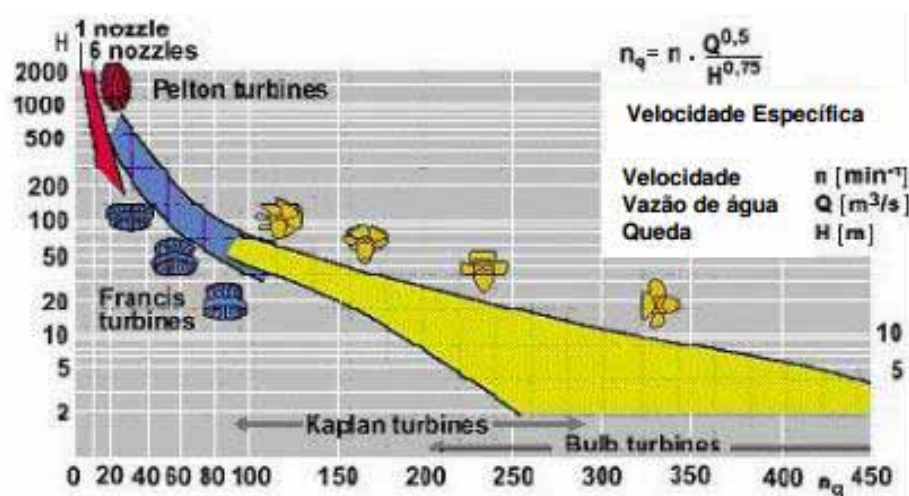
Dentre os componentes citados, analisa-se o comportamento da central hidrelétrica sob o aspecto do reservatório e do dimensionamento de unidades geradoras, pois esses são a base para determinar o regime de operação e a área alagada.

3.2 TURBINAS HIDRÁULICAS

Basicamente, as turbinas hidráulicas podem ser do tipo reação ou do tipo ação. As turbinas do tipo reação são aquelas que convertem a energia mecânico-hidráulica, das formas cinética e de pressão, em energia mecânico-motriz, enquanto as do tipo ação transformam somente a energia cinética da água. Dentre outros tipos, a turbina Pelton é do tipo ação e as turbinas Francis e Kaplan têm maior notoriedade dentre as do tipo reação.

A Figura 4 apresenta um gráfico com as faixas de aplicação das Turbinas Pelton, Kaplan e Francis, sendo possível selecionar a mais adequada ao projeto.

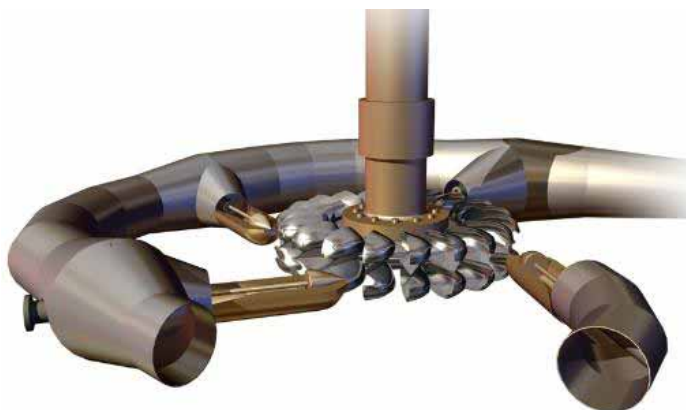
Figura 4 – Gráfico das faixas de aplicação de turbinas Pelton, Kaplan e Francis.



Fonte: VOITH (2008) *apud* MIRANDA (2009)

O rotor Pelton é constituído de uma coroa circular ao redor da qual são fixadas pás ou conchas. Essas conchas têm o formato de uma colher dupla, como se fossem montadas lado a lado, formando um septo central. A altura topográfica do aproveitamento e a potência mecânica da turbina definem o número de conchas do rotor Pelton, seu diâmetro e rotação (SIMONE, 2000). A Figura 5 ilustra a turbina mencionada, juntamente com seu respectivo rotor.

Figura 5 – Modelo 3D de uma turbina tipo Pelton com 4 injetores.



Fonte: ALSTOM (2014a).

O rotor tipo Francis é constituído por certo número de pás com perfis de curvaturas especiais, fixas e estruturadas entre as coroas interna e externa. Nesse tipo de turbina, o fluxo d'água é direcionado e distribuído igualmente na direção radial, por toda a periferia da entrada do rotor, saindo em sua direção axial (SCHREIBER, 1978). A Figura 6 ilustra o rotor de uma turbina tipo Francis durante o processo de fabricação.

Figura 6– Roda de uma turbina Francis em processo de fabricação



Fonte: ALSTOM (2014b).

O desempenho deficiente da turbina Francis sob quedas baixas conduziu à invenção das turbinas hélices, nas quais o rotor é constituído por um núcleo central, um cubo hidrodinâmico fixo à extremidade da árvore principal que sustenta um pequeno número de pás em forma de hélice. Nesse tipo de turbina, o fluxo d'água é orientado de maneira que, tanto na entrada quanto na saída do rotor, sua direção coincida com a da árvore. As turbinas hélices podem ser de pás fixas ou ajustáveis, sendo estas conhecidas como turbinas Kaplan (SCHREIBER, 1978). A Figura 7 ilustra o rotor de uma turbina tipo Kaplan.

Figura 7 – Modelo 3D de uma turbina Kaplan



Fonte: ALSTOM (2014c).

3.3 ESTRUTURAS HIDRÁULICAS E SUAS RESPECTIVAS ÁREAS ALAGADAS

O reservatório hidrelétrico tem uma importante função no armazenamento de água para regularização da geração de energia ao longo do tempo. No período chuvoso, a produção de energia está em seu ponto mais alto e o armazenamento de água fica garantido com o volume a ser consumido em períodos secos (não chuvosos) pelas turbinas hidráulicas.

O tipo de reservatório é idealizado com base em estudos do aproveitamento hidrelétrico e de sua localização geológica, sendo o aproveitamento classificado em três tipos de queda: alta, média e baixa. Observa-se que as estruturas entre a barragem e a casa de força funcionam com a seguinte concepção:

- Baixa queda, a qual tende a possuir estrutura de barragem próxima da casa de força;
- Alta queda, a qual tende a possuir estrutura de barragem longe da casa de força;

- Média queda, a qual tende a possuir distâncias intermediárias entre os tipos citados anteriormente.

Verifica-se, também, que os aproveitamentos têm características típicas no que diz respeito à série de vazões, sendo que projetos com grandes vazões referem-se às estruturas instaladas em baixa queda, e projetos com vazões menores, referem-se às estruturas instaladas em alta queda.

Conforme mencionado anteriormente, pode-se correlacionar os tipos básicos de turbinas hidráulicas aos tipos de queda, como segue:

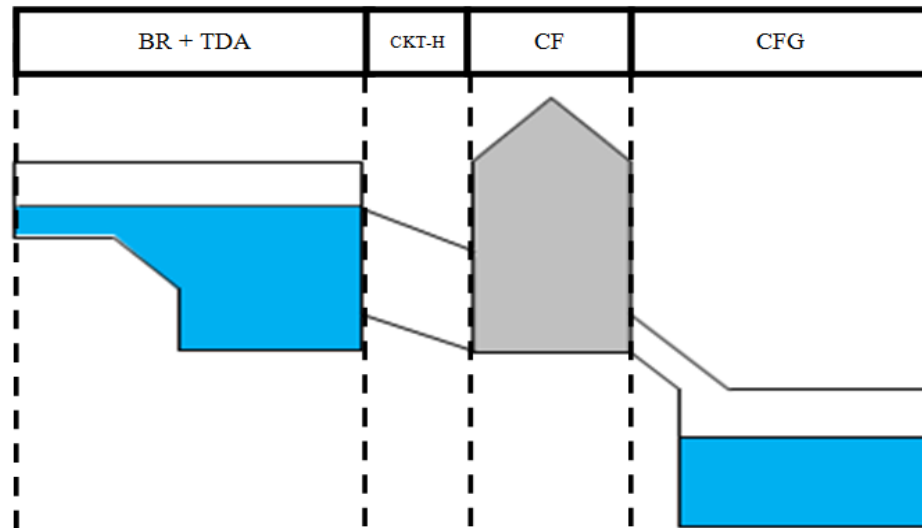
- Baixa queda: turbinas Kaplan;
- Alta queda: turbinas Pelton;
- Média queda: turbinas Francis.

Com base no exposto, pode-se determinar três esquemas básicos de geração de energia, mostrados nas Figuras 8, 9 e 10. Para melhor identificar os trechos das estruturas, deve-se considerar a seguinte legenda:

- BR: Barragem;
- TDA: Tomada d'Água;
- CKT-H: Circuito Hidráulico de adução;
- CF: Casa de força;
- CFG: Canal de fuga.

Observa-se que cada esquema de geração considera uma tecnologia de turbina hidráulica determinada pela queda do empreendimento. As estruturas de barragem possuem dimensões diferenciadas quanto à vazão do projeto.

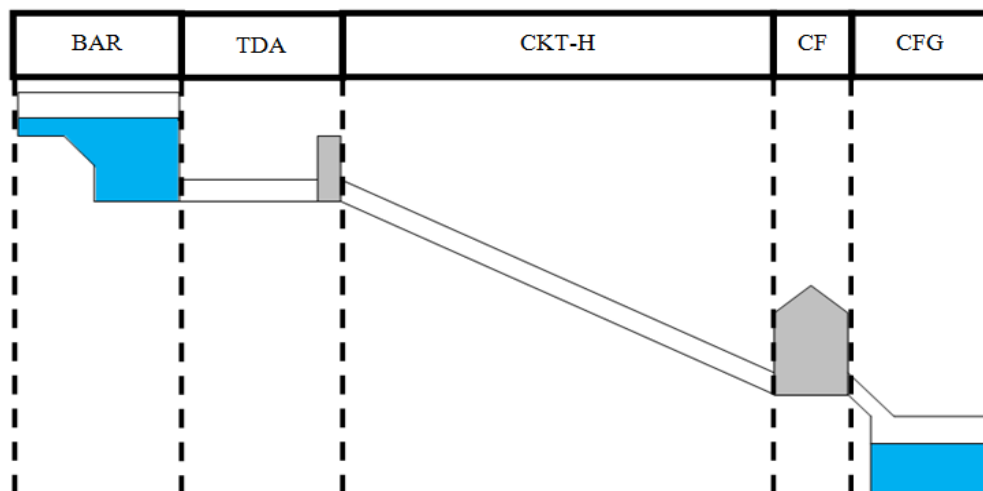
Figura 8 – Esquema típico de geração de energia em baixa queda.



Fonte: Elaborada pelo autor

Em empreendimento de baixa queda, a experiência mostra que as estruturas de barragem (BR) e de tomada d'água (TDA) ficam próximas à casa de força (CF) e o circuito hidráulico (CKT-H) possui um trecho muito curto, quase inexistente, praticamente conectado diretamente à turbina hidráulica. Normalmente, a adução de água não é feita por tubulação de aço, mas incorporada pela própria estrutura da barragem. A característica da turbina Kaplan é operar com baixa queda e com altas vazões. Dessa forma, as estruturas de barragem, o circuito de adução e o volume do reservatório ficam em tamanhos maiores e, conseqüentemente, a área alagada será maior.

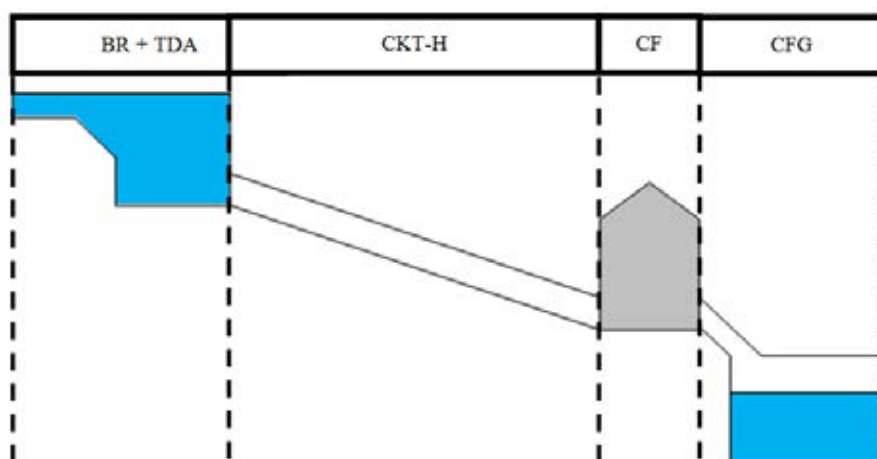
Figura 9 – Esquema típico de geração de energia em alta queda.



Fonte: Elaborada pelo autor

Em empreendimento de alta queda, as estruturas de barragem (BR) e de tomada d'água (TDA) ficam distantes da casa de força (CF) e o circuito hidráulico (CKT-H) possui um trecho muito longo. Devido às distâncias entre elas, normalmente, a adução é feita desde a barragem em canal aberto e/ou com trecho de tubulação em baixa pressão até uma estrutura intermediária de tomada d'água, quando inicia o trecho do circuito hidráulico com tubulação em alta pressão até a entrada do conjunto válvula-turbina hidráulica. A característica da turbina Pelton é operar com alta queda e com baixas vazões. Dessa forma, as estruturas de barragem e o circuito de adução ficam em menores tamanhos, inclusive o volume do reservatório e, conseqüentemente, a área alagada será menor

Figura 10 – Esquema típico de geração de energia em média queda.



Fonte: Elaborado pelo autor

Em empreendimento de média queda, as estruturas de barragem (BR) e de tomada d'água (TDA) encontram-se não tão distantes da casa de força (CF) e o circuito hidráulico de adução (CKT-H) possui um trecho de comprimento intermediário aos abordados em baixa e alta queda. Devido às distâncias entre elas, normalmente, a adução é feita por tubulação de aço em alta pressão até a entrada da turbina hidráulica. A característica da turbina Francis é operar com média queda e com vazões intermediárias às tecnologias de baixa e de alta queda. Dessa forma, as estruturas de barragem e o circuito de adução ficam também em tamanhos intermediários, inclusive o volume e a área alagada do reservatório.

Pode-se citar como exemplos algumas estruturas relacionadas às principais plantas hidrelétricas, juntamente com suas características básicas. Observa-se que o volume do reservatório de cada planta possui sua área alagada, a qual é influenciada pela regularização de vazões, pelos parâmetros de potência instalada, pela queda e pela vazão.

A Figura 11 mostra a estrutura da usina hidrelétrica de Balbina, localizada no Estado do Amazonas, a qual é classificada como um empreendimento de baixa queda e de altas vazões.

Figura 11 – Estrutura típica de usina hidrelétrica em baixa queda – UHE Balbina.



Fonte: Elaborada pelo autor com base em ELETRONORTE (BRASIL, 2014) e GOOGLE MAPS (2015).

A Tabela 2 relaciona os dados básicos da usina hidrelétrica de Balbina.

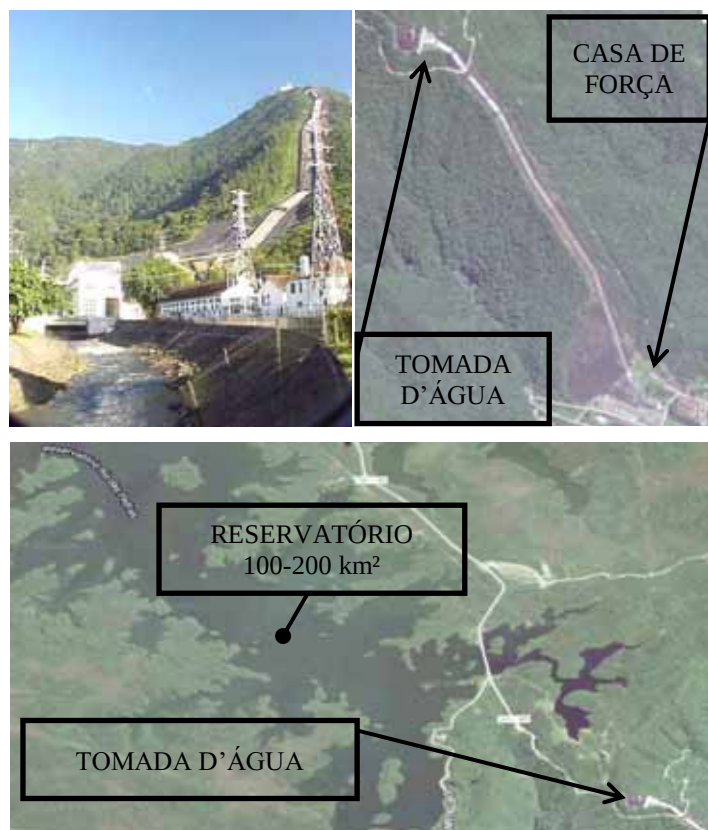
Tabela 2 – Dados básicos da UHE Balbina.

Descrição	Balbina	
	Valor	Unidade
Potência Instalada Total	250,00	[MW]
Número de Máquinas	5,00	[-]
Queda Líquida	21,85	[m]
Vazão Unitária	245,54	[m³/s]
Tipo de Turbina	Kaplan	[-]
Classificação	Baixa Queda	[-]
Área Inundada	2360	[km²]

Fonte: Elaborada a partir de dados de ETTERN/IPPUR/UFRJ (2014).

A Figura 12 mostra a estrutura da central hidrelétrica de Henry Borden, localizada no sopé da Serra do Mar, no município de Cubatão – São Paulo, a qual é classificada como um empreendimento de alta queda e aproveitamento com baixas vazões.

Figura 12 – Estrutura típica de usina hidrelétrica em alta queda – UHE Henry Borden.



Fonte: Elaborada pelo autor com base em SÃO PAULO (2014) e GOOGLE MAPS (2015).

A Tabela 3 relaciona os dados básicos da usina hidrelétrica de Henry Borden.

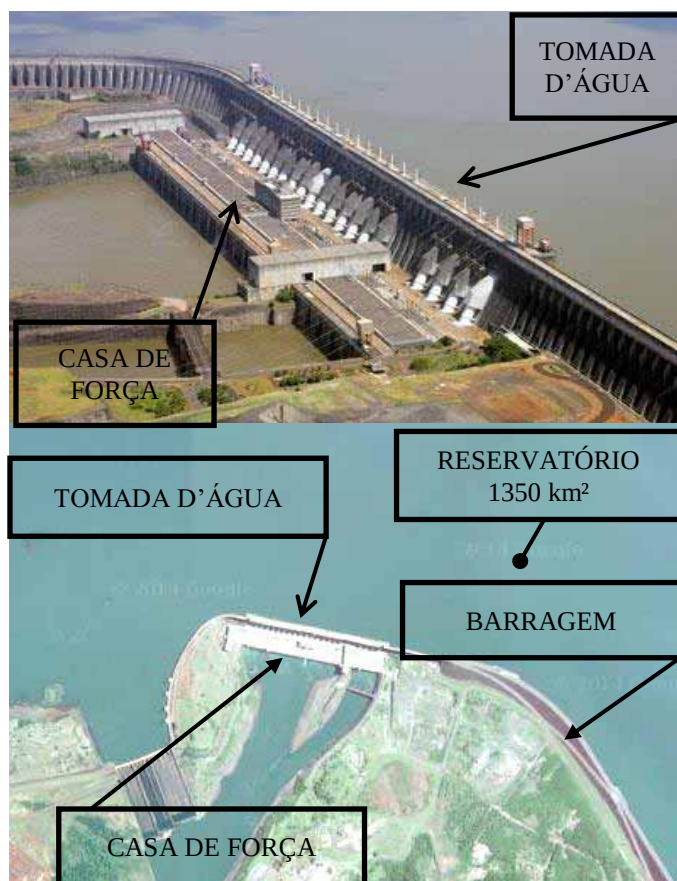
Tabela 3 – Dados básicos da UHE Henry Borden.

Descrição	Henry Borden	
	Valor	Unidade
Potência Instalada Total	889,00	[MW]
Número de Máquinas	14,00	[-]
Queda Líquida	719,50	[m]
Vazão Unitária	9,47	[m³/s]
Tipo de Turbina	Pelton	[-]
Classificação	Alta Queda	[-]
Área Inundada	100-200	[km²]

Fonte: Elaborada a partir de dados de ETTERN/IPPUR/UFRJ (2014).

A Figura 13 mostra a estrutura da usina hidrelétrica de Itaipu, classificada como um empreendimento de média queda e aproveitamento com vazões intermediárias.

Figura 13 – Estrutura típica de usina hidrelétrica em média queda - UHE Itaipu.



Fonte: Elaborada pelo autor com base em ITAIPU (2014) e GOOGLE MAPS (2015)

A Tabela 4 relaciona os dados básicos da usina hidrelétrica de Itaipu.

Tabela 4 – Dados básicos da UHE Itaipu.

Descrição	Itaipu	
	Valor	Unidade
Potência Instalada Total	14700,00	[MW]
Número de Máquinas	20,00	[-]
Queda Líquida	117,00	[m]
Vazão Unitária	674,00	[m³/s]
Tipo de Turbina	Francis	[-]
Classificação	Média Queda	[-]
Área Inundada	1350	[km²]

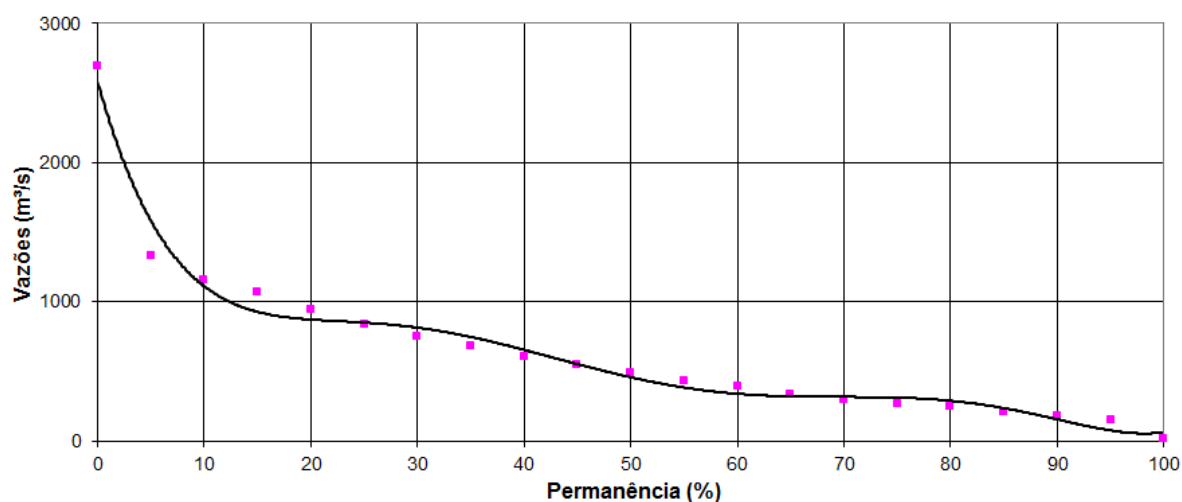
Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados de ETTERN/IPPUR/UFRJ (2014).

Verifica-se que as usinas possuem potências instaladas diferenciadas, além das estruturas de barragem e da área alagada. Balbina é considerada de baixa queda e de potência inferior em relação às demais hidrelétricas, possuindo um reservatório de grandes distâncias entre as margens e a maior área alagada dentre as citadas (2350 km²). Considerada de média queda, Itaipu possui uma potência instalada muito superior a Balbina e resulta em uma área menor (1350 km²). Nas de alta queda, como Henry Borden, apesar de significativa potência instalada, a área alagada é a menor (100-200 km²).

3.4 CURVA DE PERMANÊNCIA E O ANO TÍPICO

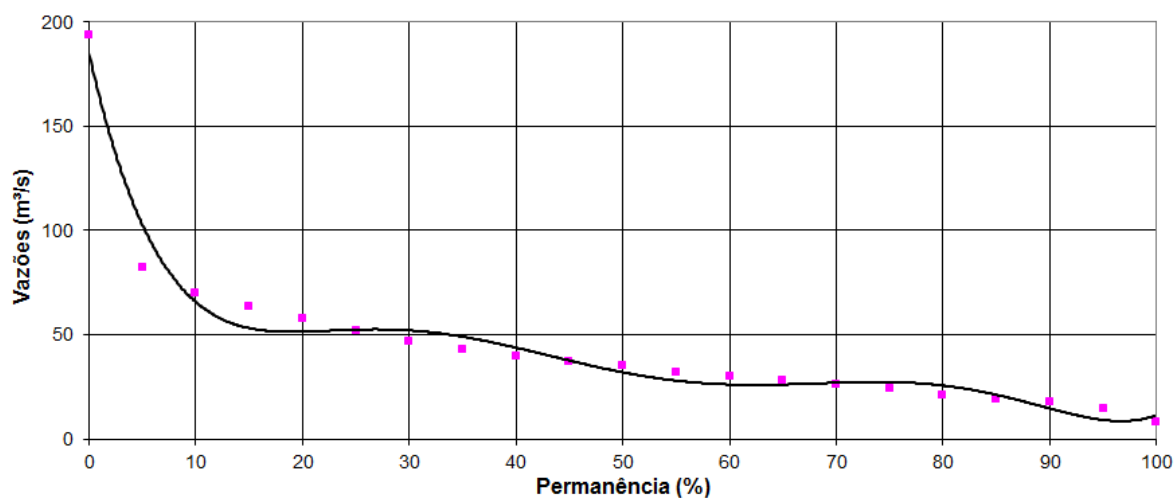
As hidrelétricas mencionadas possuem curvas de permanência que refletem as séries de vazões do aproveitamento ao longo de vários anos, sendo estas representadas através de gráficos nas Figuras 14, 15 e 16. A curva indica quanto tempo cada vazão do aproveitamento está disponível dentro de uma série de vazões.

Figura 14 – Curva de permanência - UHE Balbina.



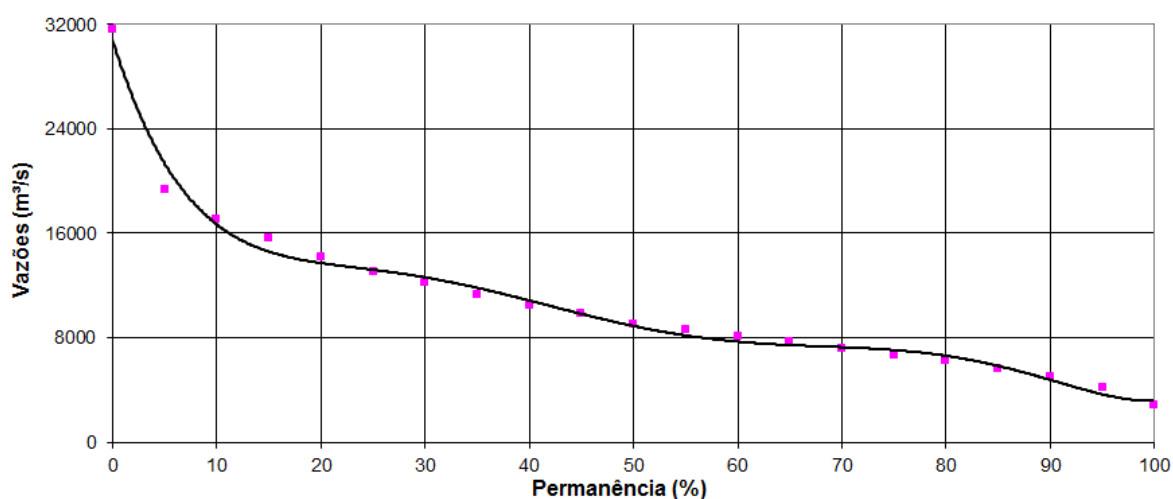
Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados do ONS (BRASIL, 2011).

Figura 15 – Curva de permanência - UHE Henry Borden.



Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados do ONS (BRASIL, 2011).

Figura 16 – Curva de permanência - UHE Itaipu.



Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados do ONS (BRASIL, 2011).

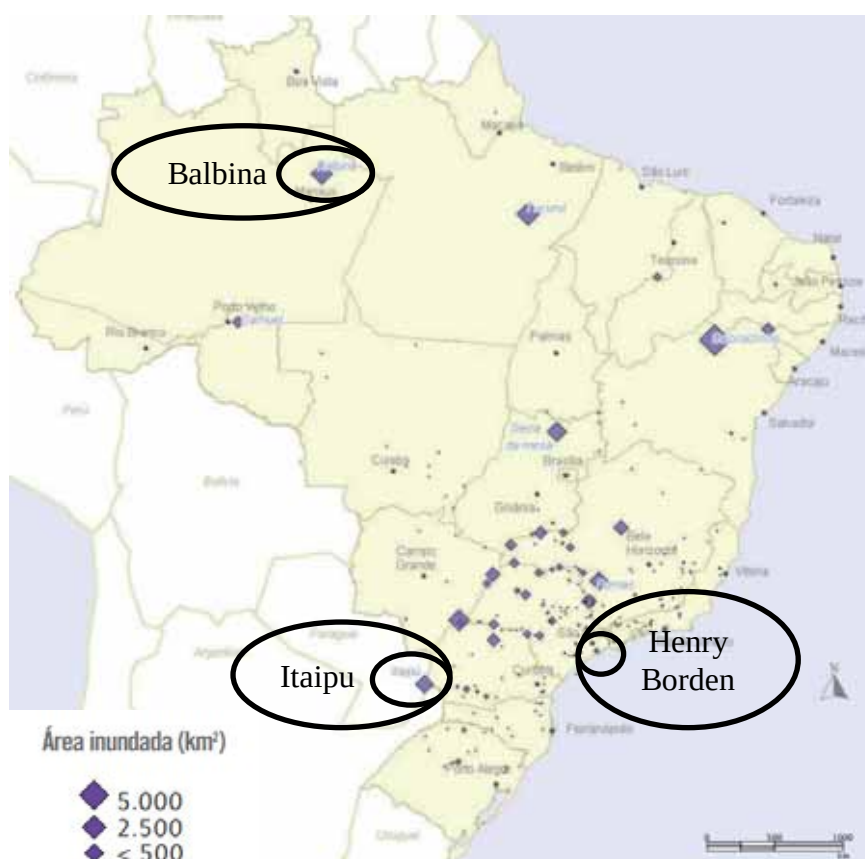
Um dos critérios no dimensionamento das hidrelétricas é identificar o ano típico, o qual representa a aproximação de todas as vazões históricas registradas através dos anos pelas estações de medição de vazões instaladas na bacia. Geralmente, as vazões são médias mensais e o ano é identificado através da somatória da diferença quadrática mensal, sendo que essa diferença é a vazão do mês em referência menos a média mensal desse mesmo mês ao longo dos anos, elevado ao quadrado.

Quando identificado o ano típico, iniciam-se os estudos de dimensionamento do volume do reservatório *versus* a motorização da usina hidrelétrica, com base no tipo de regularização (diária ou mensal) e na verificação do limiar entre o número de máquinas e a

quantidade de energia produzida. Ajustes no projeto do reservatório podem ser realizados em função dos custos calculados, os quais podem vir a impactar a viabilidade econômica do projeto. Diminuem-se as estruturas de barragem de forma a não afetar significativamente a energia produzida, identificando, assim, o melhor custo *versus* benefício do investimento e melhorando as condições de viabilidade do empreendimento.

De acordo com o Atlas de Energia da ANEEL (BRASIL, 2008), identificam-se na Figura 17 as usinas hidrelétricas segundo sua área alagada. As usinas analisadas nesse Capítulo estão destacadas e pode-se observar a representação da área alagada das mesmas, sendo que Balbina está localizada no Estado do Amazonas, Itaipu no Paraná, no trecho de fronteira entre o Brasil e o Paraguai, e Henry Borden está localizada na Serra do Mar, em Cubatão – SP.

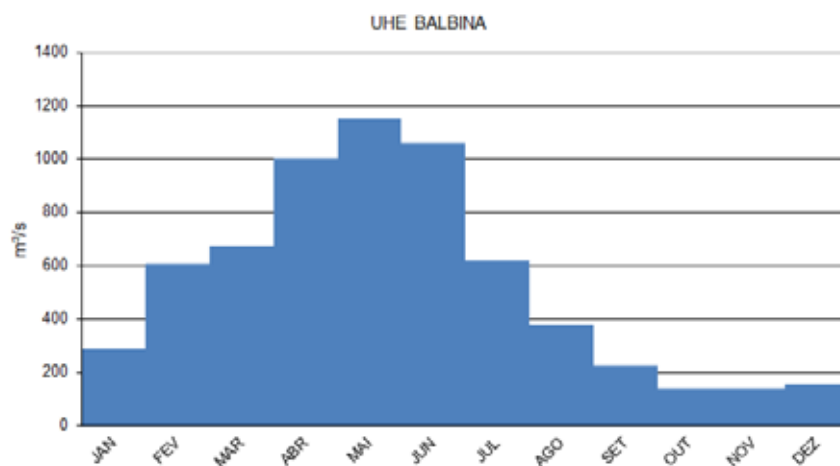
Figura 17 – Usinas hidrelétricas segundo a área alagada.



Fonte: Atlas de Energia da ANEEL (BRASIL, 2008).

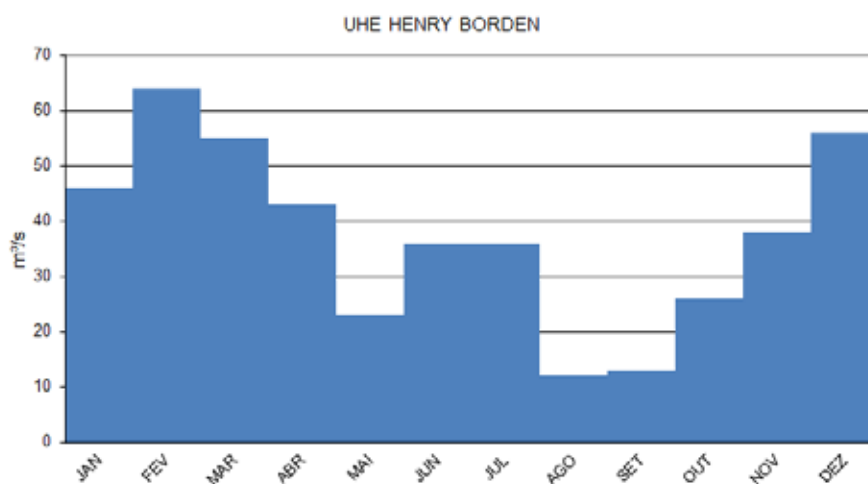
Verifica-se que os reservatórios possuem diferentes sazonalidades quando selecionado o ano típico do empreendimento com base na série histórica de vazões, conforme apresentado nas Figuras 18, 19 e 20.

Figura 18 – Vazões mensais do ano típico - UHE Balbina.



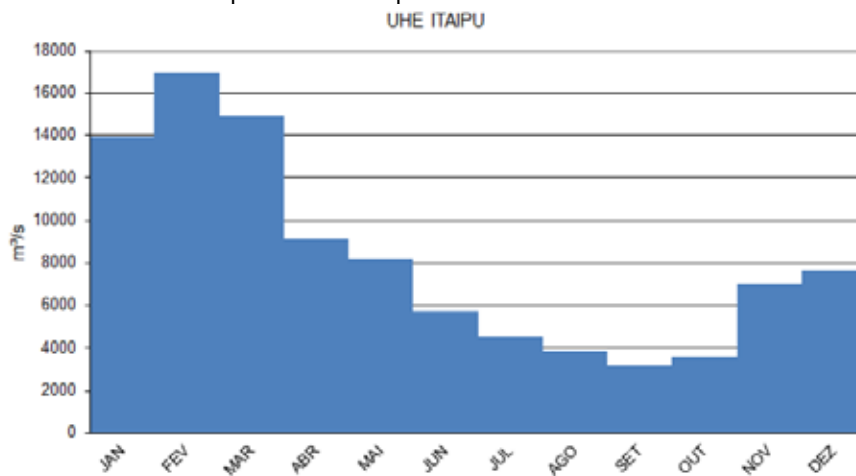
Fonte: Elaborada a partir de dados do ONS (BRASIL, 2011)

Figura 19 – Vazões mensais do ano típico - UHE Henry Borden.



Fonte: Elaborada a partir de dados do ONS (BRASIL, 2011)

Figura 20 – Vazões mensais do ano típico - UHE Itaipu.



Fonte: Elaborada a partir de dados do ONS (BRASIL, 2011).

Observa-se a existência de uma sazonalidade nas vazões mensais da bacia de cada hidrelétrica, identificando os períodos secos e chuvosos. Para compensar essas diferenças, em períodos chuvosos o reservatório armazena água suficiente para aumentar a disponibilidade da produção de energia elétrica em períodos secos. Quando analisado o efeito da sazonalidade entre os reservatórios, sob o âmbito nacional, conclui-se a importância do gerenciamento da disponibilidade de volumes entre os mesmos. Por uma questão hidrológica momentânea, algumas regiões podem ser impactadas por períodos de secas prolongadas que necessitem de uma diminuição no fornecimento de energia para armazenamento de água no reservatório, e em outras regiões, com chuva acima da média histórica ou com o armazenamento completo da capacidade, é possível gerar mais energia, de forma a compensar a produção da região afetada em determinado momento pela seca.

A Tabela 5 demonstra a variação do volume de operação máximo e mínimo das Usinas Hidrelétricas de Balbina, Henry Borden e Itaipu.

Tabela 5 – Quadro de variação de volume de operação

Hidrelétrica	Volume mínimo de operação [hm3]	Volume máximo de operação [hm3]
Balbina	9.735	19.391
Henry Borden	0,44	116,590
Itaipu	10.000	29.000

Fonte: Elaborada pelo autor com base em HYDROBYTE (2014).

Atualmente, os reservatórios estão recebendo críticas relacionadas aos impactos socioambientais. Para diminuir os impactos associados à área alagada do reservatório hidrelétrico, opta-se pela diminuição do tamanho dos mesmos. Porém, é preciso refletir sobre os riscos que uma diminuição no acúmulo da água pode trazer ao sistema elétrico em um cenário de escassez de chuvas.

CAPÍTULO 4 FATORES QUE INFLUENCIAM NAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DOS RESERVATÓRIOS

4.1 DENSIDADE DE POTÊNCIA

Mäkinen e Khan (2010) apresentam a seleção de estudos sobre o tema e relacionam os pesquisadores, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Seleção de estudos sobre emissões de reservatórios.

Autor	Ano	Local do estudo	Principal Pesquisa / Conclusão
Rudd et al.	1993	Canadá	“Fluxos de GEE vindos de hidrelétricas podem ser significativos comparados à emissão de geração elétrica por combustível fóssil.”
St. Louis et al.	2000	Global: Inclui estudos do Canadá , Estados Unidos, Finlândia, Brasil, Guiana Francesa e Panamá	“Superfícies dos reservatórios são fontes de GEE e suas áreas são muito grandes, sendo que estas emissões deveriam ser incluídas no inventário global de emissões antrópicas.”
Fearnside	2002	Brasil	“Barragens de hidrelétricas em área de floresta tropical produzem níveis substanciais de emissões de GEE, os quais precisam ser considerados para uma balanceada avaliação de opção de energia.”
Rosa et al.	2004	Brasil	“Barragens de hidrelétricas não são culpadas em termo de GEE. Maiores experimentos e monitoramento de longo prazo são requeridos para aumentar a certeza de extrapolações devido a significantes variações espaciais e temporais em registros de níveis de emissão.”
Guérin et al.	2006	Guiana Francesa e Brasil	“Importância das emissões a jusante.”
Santos et al.	2006	Brasil	“Reservatórios hidrelétricos com baixa densidade podem ter níveis de emissões comparados às plantas térmicas”
Lima et al.	2008	Brasil, Índia e China	“Emissões de metano em reservatórios podem ser significativass e constituem uma potencial fonte de energia.”

Siqueira e Silveira 2010

Brasil

“Emissões de GEE devem ser analisadas incluindo-se o comportamento de um modelo de reservatório com características de figura geométrica trapezoidal, considerando o comportamento da série histórica de vazões e o regime de operação da hidrelétrica.”

Fonte: Elaborada pelo autor com base em MÄKINEN e KHAN (2010, tradução nossa); SIQUEIRA e SILVEIRA (2010) incorporado pelo autor.

Mäkinen e Khan (2010) recomendam a restrição de projetos hidrelétricos com base no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), no qual se baseia o relatório da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) de 2006. Para identificar as hidrelétricas como potenciais emissoras de GEE, o MDL determina uma verificação pela densidade de potência, a qual é a razão da potência instalada da usina com sua respectiva área alagada (W/m^2). Isso significa que um baixo valor para a densidade de potência indica que a usina hidrelétrica precisa de uma grande área alagada para produzir energia elétrica. O oposto é o desejado, ou seja, quanto maior a densidade de potência menor será a área a ser alagada para produção de eletricidade.

Os mesmos autores classificam que projetos com a densidade de potência inferior a 4 W/m^2 são desconsiderados do ambiente de MDL, ao contrário dos que possuem valores superiores a 10 W/m^2 , cujas emissões de GEE são desprezadas. Quando a densidade estiver compreendida entre 4 e 10 W/m^2 , o projeto é caracterizado dentro de uma emissão de $90 \text{ gCO}_2\text{-eq/kWh}$.

Outros autores analisam as hidrelétricas pela densidade de potência, classificando-as como fontes emissoras de GEE de acordo com sua potencialidade.

Rosa et al. (2006) apontam o risco de emissões de GEE, podendo esse ser reduzido quando evitada a densidade de potência abaixo de $0,1 \text{ W/m}^2$ e com a limpeza da biomassa antes da inundação do reservatório.

Dentro das pesquisas mencionadas na Tabela 6, destacam-se os trabalhos de Rosa et al. (2004) e Santos et al. (2004), por figurarem entre os autores que trabalharam na elaboração do inventário brasileiro de emissões antrópicas em reservatórios nacionais. As conclusões dos dois autores direcionam, respectivamente, para o maior monitoramento a longo prazo, com a finalidade de aumentar a confiabilidade dos dados obtidos em campo e dos estudos empíricos, e para a possibilidade de reservatórios de hidrelétricas emitirem gases superiores a uma planta térmica equivalente.

Quanto maior for o registro do histórico no monitoramento dos parâmetros relacionados às emissões de poluentes, maior será a confiabilidade e o embasamento para a tomada de decisões para mitigação dos impactos e para a escolha da melhor forma de geração de energia (por exemplo, térmica ou hidráulica). O tema é recente quando comparado ao histórico de vazões obtido pelas estações pluviométricas (registros desde 1931) e pela experiência em construções de plantas hidrelétricas no Brasil, desde a instalação da primeira usina hidrelétrica em 1883, em Minas Gerais, até a inauguração de Itaipu, em 1982, a maior hidrelétrica do mundo, à época, sendo posteriormente superada por Três Gargantas, na China (ELETROBRAS, 2010).

Santos et al. (2006) concluem que existem incertezas na extrapolação de dados de um reservatório para outro e que maiores pesquisas direcionadas à identificação de parâmetros que correlacionam os comportamentos entre as hidrelétricas estudadas tornam-se importantes, a fim de determinar a metodologia que alcance um grau de aproximação nas emissões de GEE entre os reservatórios.

A Tabela 7 relaciona os reservatórios estudados pelo MCT juntamente com as respectivas densidades de potência.

Tabela 7 – Densidade de potência dos reservatórios estudados.

Hidrelétrica	Estado	Potência (MW)	Área Alagada (km ²)	Densidade de Potência (W/m ²)
Miranda	Minas Gerais	390	51	7,71
Três Marias	Minas Gerais	396	1.040	0,38
Barra Bonita	São Paulo	141	312	0,45
Segredo	Paraná	1.260	82	15,37
Xingó	Alagoas/Sergipe	3.000	60	50,00
Samuel	Roraima	216	559	0,39
Tucuruí	Pará	4.240	2.430	1,74
Serra da Mesa	Goiás	1.275	1.784	0,71
Itaipu	Paraná	12.600	1.549	8,13

Fonte: BRASIL (2006a).

Fearnside (2008) questiona o comportamento das hidrelétricas quanto ao seu papel de geração limpa de energia ao analisar usinas instaladas em florestas tropicais, tais como Tucuruí, Balbina, Curuá-Una. Instalações em regiões tropicais possuem riscos maiores de emissões de GEE quando comparadas às emissões de uma planta térmica equivalente, devido à grande área alagada pelo reservatório.

A hidrelétrica de Curuá-Una é um reservatório em que as altas emissões ocorrem devido à baixa densidade de potência, relativa ao tamanho do represamento e à produção de energia. Inclui-se, ainda, uma grande área de deplecionamento que inunda e expõe a vegetação, juntamente com a biomassa (árvores) deixada durante a construção, provocando as emissões de gases através da decomposição anaeróbica (FEARNSIDE, 2005).

A usina de Tucuruí possui uma densidade de potência em torno de 0,81 W/m² e as emissões são consideradas significativas quando comparadas à uma geração térmica equivalente, porém, de menor impacto no aquecimento global (GWP) no horizonte de 100 anos, no qual o potencial GWP do metano é menor quando comparado ao horizonte de 20 anos. Utiliza-se a forma de avaliação pela atratividade da hidrelétrica para analisar a escolha pela geração hidráulica ou térmica. Quando a usina hidrelétrica é ponderada pela emissão e pelos impactos minoritários em relação à termoeletrônica, a taxa de juros no financiamento se torna atraente, de forma a viabilizar o empreendimento (FEARNSIDE, 1997).

Santos et al. (2006) comparam as emissões estudadas em reservatórios brasileiros com plantas termoeletrônicas equivalentes. A Tabela 8 mostra os resultados das emissões por hidrelétricas e observa-se que aquelas com baixa densidade de potência tendem a emitir maiores toneladas de Carbono por ano (tC/ano). Os mesmos autores apresentam a Equação de conversão dos gases em equivalente de tonelada de massa de carbono-ano (Ce_ano), conforme Equação (1).

$$Ce_ano = \frac{(CH_4 \times \frac{12}{16} \times I_{GWP} + CO_2 \times \frac{12}{44}) \times T}{1000} \quad (1)$$

onde:

Ce_ano: emissão equivalente de tonelada de massa de carbono [tC]

I_{GWP} : índice de potencial de aquecimento global [-]

T: tempo [dias]

Tabela 8 – Emissões equivalentes de tC por reservatórios brasileiros.

Hidrelétrica	Potência (MW)	Área Alagada (km ²)	Densidade de Potência (W/m ²)	Emissão (tC/Ano)	Emissão/Área Alagada (tC/km ²)	Bioma
Miranda	390	51	7,71	38.332	752	Cerrado
Três Marias	396	1.040	0,38	540.335	520	Cerrado
Barra Bonita	141	312	0,45	137.341	440	Mata Atlântica
Segredo	1.260	82	15,37	23.497	286	Mata Atlântica
Xingó	3.000	60	50,00	41.668	695	Caatinga
Samuel	216	559	0,39	535.407	958	Amazônica
Tucuruí	4.240	2.430	1,74	2.602.945	1071	Amazônica
Serra da Mesa	1.275	1.784	0,71	895.373	502	Cerrado
Itaipu	12.600	1.549	8,13	93.269	60	Mata Atlântica

Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados do MCT (BRASIL, 2006) e SANTOS et al. (2006).

Verifica-se que não existe uma relação direta de emissões de GEE pela área alagada (tC/km²) entre os reservatórios. Miranda possui a menor área alagada e a maior emissão quando comparada com Segredo, a qual possui uma área maior. Dessa forma, as emissões das hidrelétricas não podem ser consideradas somente sob o ponto de vista da área alagada. Outros parâmetros devem ser analisados para determinar o cálculo das emissões de poluentes em centrais hidrelétricas, como as características do regime de operação e da qualidade da água, os quais influenciam nas relações com o bioma e as condições climáticas. O regime de operação determina, por exemplo, a sazonalidade do reservatório e os indicadores de qualidade influenciam na velocidade dos processos bioquímicos na decomposição de bactérias aeróbicas e anaeróbicas, tais como, a temperatura (estratificação) e a demanda de oxigênio no interior do reservatório.

4.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DOS RESERVATÓRIOS E OS MODELOS GEOMÉTRICOS

Muitos fatores influenciam nas emissões de GEE dos reservatórios e, devido à complexidade do tema e à grande quantidade de variáveis envolvidas, torna-se importante a elaboração de um modelo que as correlacione com o regime operacional da usina hidrelétrica.

A Tabela 9 identifica os principais fatores de influência nas emissões de GEE pelos reservatórios.

Tabela 9 – Fatores de influência nas emissões de reservatórios.

Descrição dos Fatores	Referência
“Tipo e densidade da vegetação dentro do reservatório, crescimento de macrófitas aquáticas, velocidade do vento, temperatura, saturação de oxigênio, nível da água.”	(UNESCO, 2008, tradução nossa)
“Temperatura do ar e da água, chuvas, luz ou parâmetros chave como oxigênio dissolvido, carga de carbono, tempo de residência ou produção primária.”	(UNESCO, 2008, tradução nossa)
“Profundidade do local, tipo de vegetação inundada, idade do afogamento, temperatura da água, regime de ventos e intensidade da correnteza.”	(SANTOS, et al., 2008)
“Perfil de concentração de metano, ciclos sazonais em concentração, profundidade da turbina, e vertedouros, junto com as informações sobre os níveis de água no reservatório e a posição das turbinas e vertedouros, e os respectivos fluxos de água nessas estruturas.”	(FEARNSIDE, 2008)

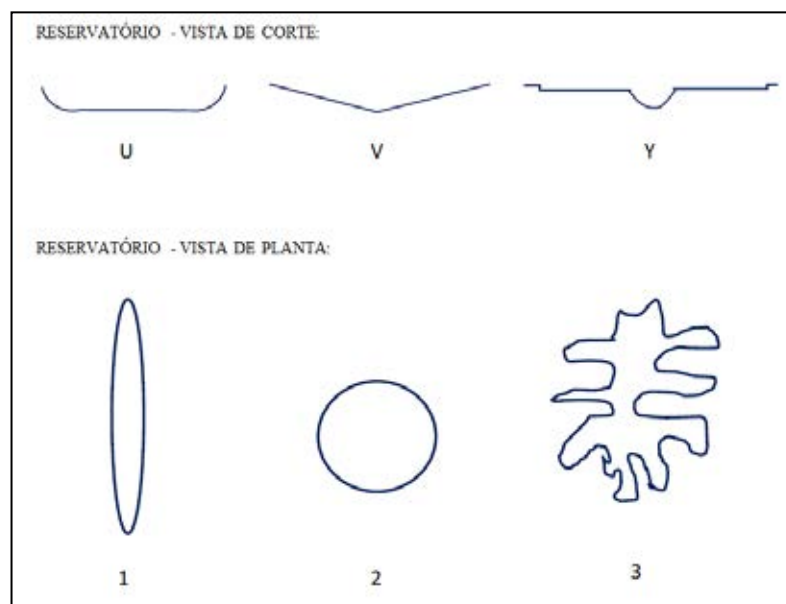
Fonte: Elaborada pelo autor a partir de referências indicadas.

O relatório da UNESCO (2008) apresentou uma avaliação referente à situação das emissões de GEE pelos reservatórios, as quais requerem a melhoria das informações e a elaboração de ferramentas que auxiliem na tomada de decisões e nas ações de mitigação, tanto para os novos empreendimentos quanto para os já existentes.

A ferramenta disponibilizada pela IHA (2012), em sua versão beta, apresenta três modelos empíricos de reservatórios com as seções típicas denominadas de U, V e Y e as superfícies de área alagada nos formatos 1 (oval), 2 (circular) e 3 (irregular), conforme mostra

a Figura 21. As emissões são relacionadas com a idade do reservatório, a temperatura, a precipitação anual e as áreas inundadas pela sazonalidade do reservatório.

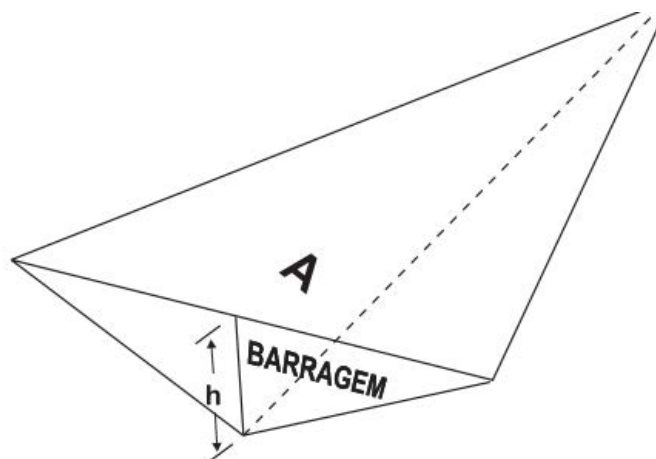
Figura 21 – Modelos empíricos de reservatórios - IHA.



Fonte: IHA (2012).

O MCT apresenta outro tipo de modelo, idealizado em uma pirâmide (BRASIL, 2006a), conforme apresentado na Figura 22. Reduz-se a área de superfície “A” quando o nível do reservatório diminui, ou seja, quando a altura da água h diminui. A forma da superfície da água é considerada como um triângulo.

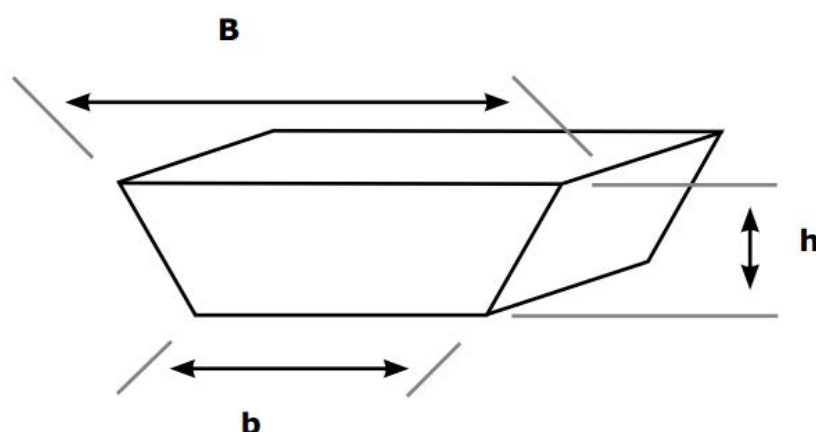
Figura 22 – Modelo geométrico de reservatório - MCT.



Fonte: BRASIL (2006a).

Siqueira e Silveira (2010) desenvolveram um modelo de reservatório hipotético com base no volume e na seção de uma figura plana trapezoidal. Aplicou-se o efeito da série histórica de vazões mensais do empreendimento e determinaram-se as emissões de CO_2 e CH_4 mensais com base no comportamento da área alagada, juntamente com os limites operacionais da hidrelétrica. A Figura 23 apresenta a modelagem trapezoidal do reservatório.

Figura 23 – Modelagem trapezoidal do reservatório.



Fonte: SIQUEIRA E SILVEIRA (2010).

Verifica-se que o modelo trapezoidal contribui para um melhor ajuste devido à característica do trapézio com sua seção formada pelas bases maior e menor. Quando adaptadas, podem alcançar as formas aproximadas dos modelos específicos citados pelo IHA e pelo MCT.

Com a finalidade de relacionar o modelo trapezoidal com fatores que influenciam nas emissões de GEE, inclui-se a qualidade da água e o regime operacional como parâmetros a serem considerados.

A qualidade da água, enquanto associada às emissões de superfície do reservatório, é influenciada pelas reações bioquímicas que ocorrem no interior do mesmo e pelas influências vindas de regiões circunvizinhas ao reservatório, como a inundação da área de florestas tropicais (causadas pelos deplecionamentos relativos à operação da hidrelétrica), os dejetos lançados pelas cidades ao longo da bacia a sazonalidade das vazões do próprio rio, os impactos relativos à instalação da barragem (diminuição da velocidade da água, da oxiclina, da luz, tempo de residência, sedimentos), dentre outros.

Uma vez construído o reservatório, o regime de operação da usina é influenciado pela série histórica de vazões, modificando-se a coluna d'água e a pressão sobre os corpos nas

camadas profundas, ocasionando o desprendimento por bolhas e influenciando as emissões de GEE.

Este trabalho relaciona o comportamento operacional da descarga do reservatório com a analogia elétrica de um circuito RC (Resistor e Capacitor), a fim de especificar o efeito do reservatório sendo esvaziado pelo consumo de água das turbinas. Com isso, tem-se a relação do efeito das emissões de GEE com a operação da usina hidrelétrica, como a cota operacional do reservatório, o tempo de residência e as influências do reservatório e das turbinas.

Observa-se, ainda, o comportamento dos perfis verticais da qualidade da água e o regime de operação. Considera-se que eles representam o resultado de várias influências internas e externas ao reservatório, como profundidade do local, tipo de vegetação inundada, idade do afogamento, temperatura da água, regime de ventos, tempo de residência, intensidade da correnteza, efeito da profundidade na concentração do metano, entre outros.

Os parâmetros físico-químicos que resultam no indicador da qualidade da água são abordados nesse Capítulo, no item 4.4. Nesse item, cada parâmetro é representado por uma curva que resulta na indicação do quanto está ou não degradável dentro de uma escala de 0-100, respectivamente.

4.3 CICLO DE CARBONO E AS REAÇÕES NOS RESERVATÓRIOS

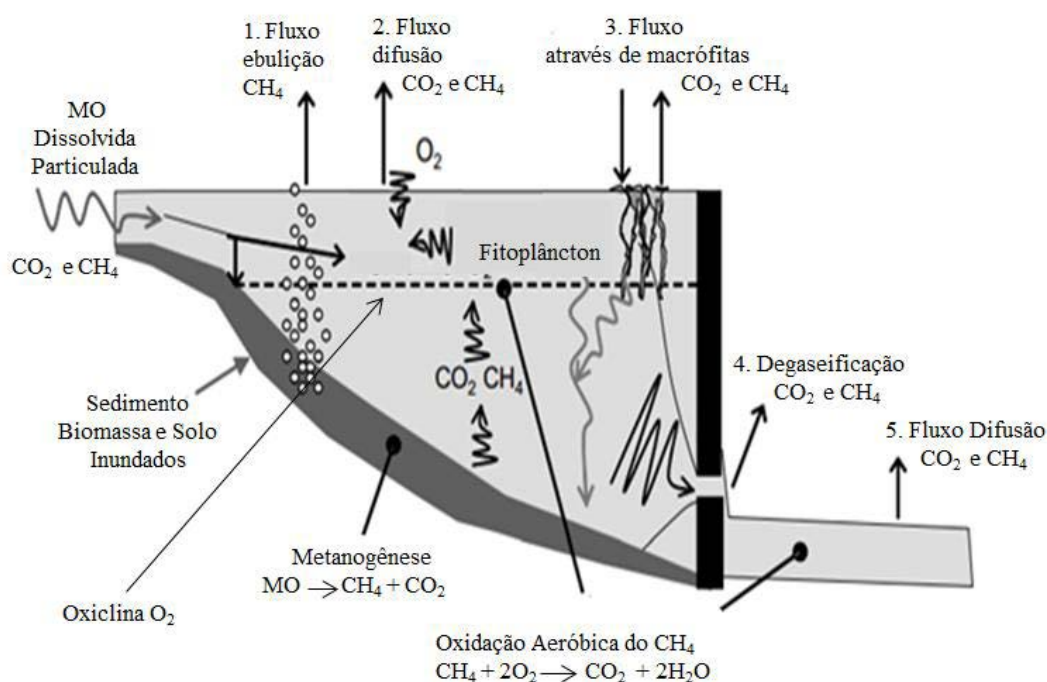
O ciclo de carbono representa o movimento do carbono pela biosfera, sendo esse o elemento químico básico dos carboidratos, lipídios, proteínas, DNA e outros compostos orgânicos necessários para a vida. Baseia-se no gás carbônico (dióxido de carbono), que, além de compor 0,0038% do volume da troposfera, também está dissolvido na água, sendo um termostato natural e tendo influência na temperatura global. Pequenas alterações nesse ciclo podem afetar o clima e as formas de vida dependentes da temperatura do meio (MILLER, 2011).

Em reservatórios, a influência do ciclo de carbono é medida pelo comportamento das emissões de dióxido de carbono (CO_2) e de metano (CH_4) provenientes das reações de microrganismos aeróbicos e anaeróbicos. Estas são resultado da decomposição da matéria orgânica vinda das áreas próximas à barragem (plantas e solos inundados), no interior do reservatório, e outras advindas da própria bacia hidrográfica (UNESCO, 2008).

A Figura 24 ilustra tais reações. As formas de emissões de GEE são apresentadas pelos seguintes processos: (1) por ebulição; (2) por difusão; (3) pelas plantas aquáticas

(macrófitas); (4) pelas águas profundas liberadas para jusante e (5) por difusão a jusante. A ebulição é o processo de emissões de gases por bolhas na coluna d'água, enquanto a difusão ocorre na superfície do reservatório (água-ar). Outras formas são a oxidação aeróbica, que ocorre nas regiões próximas à linha limite superior do oxiclina e na superfície da bacia hidráulica a jusante do reservatório, e a metanogênese, que é o processo de decomposição de compostos orgânicos pelas bactérias anaeróbicas, resultando em metano e dióxido de carbono.

Figura 24 – Ciclo de carbono - Reações nos reservatórios.



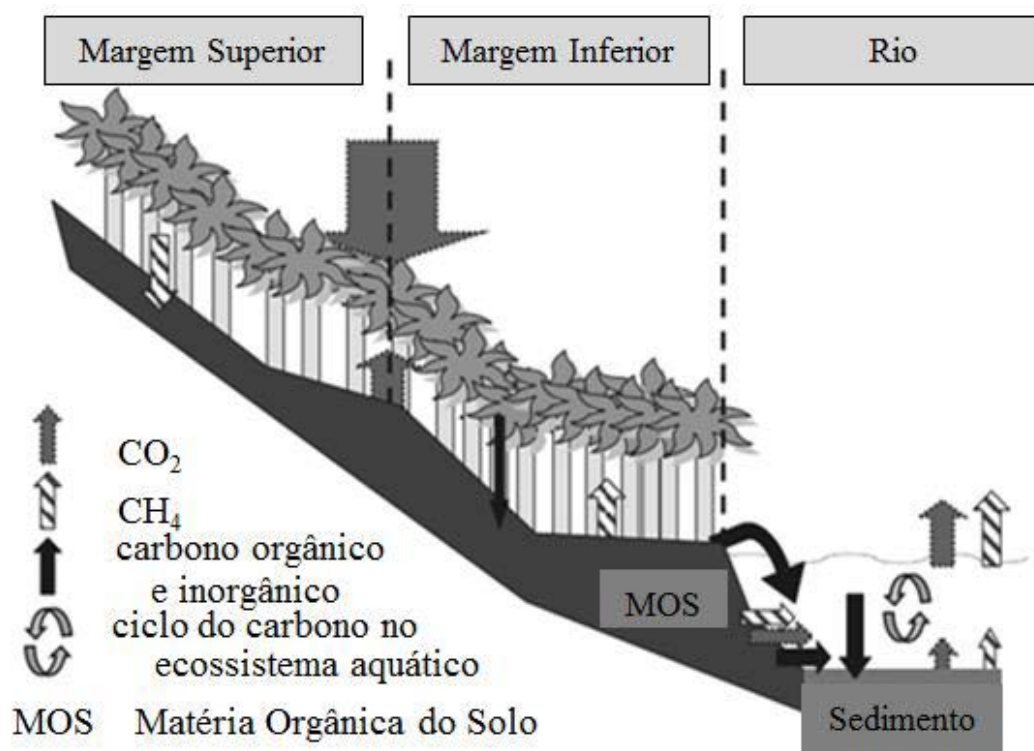
Fonte: UNESCO (2008).

Os reservatórios recebem as matérias orgânicas na forma autóctone, disponível como matéria orgânica inundada (solo, vegetação e madeira), e na forma alóctone, proveniente das matérias advindas dos afluentes recebidos da parte montante do reservatório. A linha imaginária que divide as decomposições anaeróbicas e aeróbicas é a oxiclina, a qual determina a profundidade limite em que se encontra o oxigênio na água; após esse limite, a taxa de oxigênio diminui rapidamente. Sendo assim, a decomposição aeróbica ocorre na região superior limite da oxiclina (com oxigênio) e a decomposição anaeróbica acontece na parte inferior desse limite (ausência de oxigênio).

Importante ressaltar que os sedimentos provenientes do fluxo de água da bacia estão carregados de carbonos orgânicos e inorgânicos, pois o percurso do rio está em contato com o

solo e as margens laterais que, ao sofrerem o efeito da sazonalidade dos níveis de água, trazem nutrientes e sedimentos para o interior da bacia hidráulica. A Figura 25 ilustra a existência de uma interação entre a superfície terrestre e a bacia hidráulica.

Figura 25 – Ciclo de carbono – Interação entre a superfície terrestre e a bacia hidráulica.



Fonte: UNESCO (2008).

O ciclo hidrológico contribui para a distribuição de suprimento de água da terra e a energia solar provoca a evaporação da água presente na superfície terrestre. Considera-se que 84% do vapor da atmosfera provém dos oceanos e, o restante, da terra. Nesse ciclo, uma parte da água doce que retorna para a superfície em forma de precipitação fica retida nas geleiras, outra parte infiltra e percorre o solo e as formações de rochas permeáveis em direção às áreas de armazenamento de águas subterrâneas (aquíferos) (MILLER, 2011).

No entanto, grande quantidade das precipitações que caem sobre os ecossistemas terrestres transforma-se em escoamento superficial. Essa água flui para lagos, córregos e rios, sendo levada novamente para os oceanos, de onde ela pode evaporar e reiniciar o ciclo. Além de reabastecer as bacias, o escoamento da superfície causa a erosão, que leva fragmentos de solos e rochas de um lugar para o outro. Ao dissolver inúmeros compostos de nutrientes, a água os transporta entre os ecossistemas e dentro deles (MILLER, 2011).

4.4 QUALIDADE DA ÁGUA NOS RESERVATÓRIOS

O processo de decomposição está vinculado ao comportamento do reservatório e à qualidade da água que prevalece na bacia a ser instalada em determinada hidrelétrica. Sendo assim, inclui-se o impacto da qualidade da água nas emissões de GEE como forma de implementar o indicador de poluição da usina hidrelétrica.

Oram (2011) menciona que o índice de qualidade da água foi criado pela Fundação Nacional Sanitária (NSF) no ano de 1970, a partir de uma consulta de opinião a 142 especialistas em gestão da qualidade da água, os quais atribuíram peso relativo a cada parâmetro, através de uma escala de valores. Inicialmente, foram propostos 35 parâmetros indicadores de qualidade, sendo que apenas 9 foram selecionados. O índice de qualidade da água é o resultado da somatória de uma média ponderada entre eles, de acordo com a sua importância. Tem-se que os principais parâmetros da água são: variação de temperatura; oxigênio dissolvido; pH; bactéria coliforme; nitratos; fósforo; demanda bioquímica de oxigênio; sólidos suspensos e turbidez, os quais serão mencionados posteriormente.

No Brasil, o índice foi adaptado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) em 1975 e, nas décadas seguintes, outros Estados brasileiros adotaram o IQA, que hoje é o principal índice de qualidade da água utilizado no país (BRASIL, 2015).

A NSF define a ponderação de cada parâmetro na determinação do IQA, conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Fator de ponderação dos parâmetros de qualidade da água.

Parâmetro	Símbolo	Ponderação
Oxigênio Dissolvido	OD	0,17
Coliforme Fecal	CF	0,16
pH	Ph	0,11
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	0,11
Variação de Temperatura	ΔT	0,10
Fosfato – Total	PO ₄	0,10
Nitrato	NO-3	0,10
Turbidez	UNT	0,08
Sólidos Totais	ST	0,07

Fonte: ORAM (2011).

Conforme Oram (2011), o cálculo do IQA é realizado através do somatório do produto de cada indicador da qualidade referente ao parâmetro (obtido por gráfico) pela respectiva ponderação mencionada na Tabela 10, resultando em um IQA entre 0 e 100. A Equação (2) determina o IQA.

$$IQA = 0,17 \times OD + 0,16 \times CF + 0,11 \times Ph + 0,11 \times DBO + 0,10 \times \Delta T + 0,10 \times PO_4 + 0,10 \times NO-3 + 0,08 \times UNT + 0,07 \times ST \quad (2)$$

Posteriormente, serão apresentados os gráficos da NSF, juntamente com as definições de cada parâmetro com base nos documentos de vigilância e de controle da qualidade da água para consumo humano do Ministério da Saúde (BRASIL, 2006b; BRASIL, 2015; SÃO PAULO, 2009).

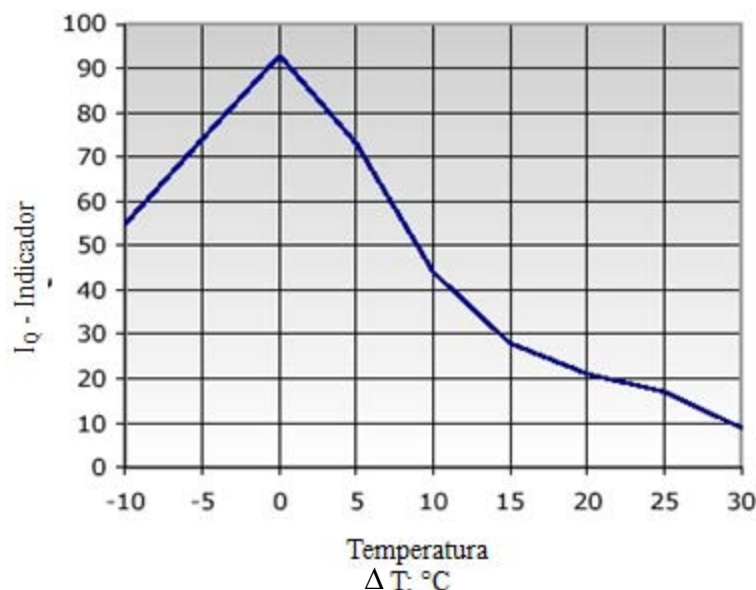
4.4.1 Temperatura

A temperatura (ΔT) é um importante parâmetro físico-químico que influencia no comportamento das reações químicas, nas atividades metabólicas dos organismos e na solubilidade de substâncias. As fontes que provocam a variação de temperatura da água podem ser impactadas através de uma fonte natural, como a energia solar, ou através de fontes antropogênicas, destacando-se os despejos industriais e as águas de resfriamento de máquinas (BRASIL, 2006b).

A temperatura superficial é influenciada por diversos fatores, tais como, latitude, altitude, estação do ano, período do dia, taxa de fluxo e profundidade. A elevação da temperatura geralmente é provocada por despejos industriais e por usinas termelétricas. Em geral, à medida que a temperatura aumenta, de 0 a 30°C, viscosidade, tensão superficial, compressibilidade, calor específico, constante de ionização e calor latente de vaporização diminuem, enquanto a condutividade térmica e a pressão de vapor aumentam (SÃO PAULO, 2009).

A Figura 26 ilustra o indicador de qualidade referindo-se ao parâmetro temperatura.

Figura 26 – Gráfico - Indicador de qualidade: variação de temperatura.



Fonte: ORAM (2011).

De acordo com o gráfico, a temperatura tem o indicador de qualidade (I_Q) ao máximo partindo da referência zero no eixo x. De acordo com a variação de temperatura, para mais ou para menos, o parâmetro resulta em um número de 0 a 100. Uma variação de -5°C determina um valor de 72, enquanto uma variação de $+10^{\circ}\text{C}$ resulta em um valor de 42.

4.4.2 Oxigênio Dissolvido

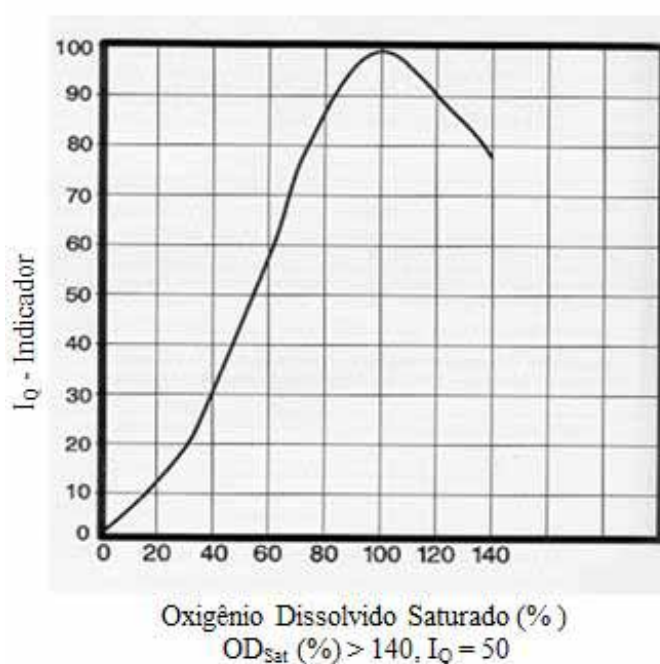
O oxigênio dissolvido (OD) é um parâmetro significativo na qualidade do meio aquático, sofrendo influências da temperatura, pressão e salinidade. As variações nos teores de oxigênio dissolvido estão associadas aos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nos corpos d'água. Geralmente, a vida aquática necessita de valores de OD entre 2 mg/L a 5 mg/L (BRASIL, 2006b).

O oxigênio dissolvido é fundamental para a preservação da vida aquática, pois vários organismos (ex: peixes) precisam de oxigênio para respirar. As águas poluídas por esgotos apresentam baixa concentração de oxigênio dissolvido tendo em vista que o mesmo é consumido no processo de decomposição da matéria orgânica. Por outro lado, as águas limpas apresentam maiores concentrações de oxigênio dissolvido, geralmente superiores a 5mg/L. Já em águas eutrofizadas (ricas em nutrientes) é possível haver concentrações de oxigênio superiores a 10 mg/L, situação conhecida como supersaturação. Isso ocorre principalmente

em lagos e represas em que o excessivo crescimento das algas faz com que, durante o dia, devido à fotossíntese, os valores de oxigênio fiquem mais elevados. Por outro lado, durante a noite, não ocorre a fotossíntese, e a respiração dos organismos faz com que as concentrações de oxigênio diminuam bastante, podendo causar mortandades de peixes (BRASIL, 2015).

A Figura 27 mostra o indicador de qualidade relacionando-se ao parâmetro oxigênio dissolvido saturado ($OD_{Sat}\%$), o qual confronta o OD com a solubilidade do oxigênio, a temperatura da água e a pressão atmosférica.

Figura 27 – Gráfico - Indicador de qualidade: oxigênio dissolvido.



Fonte: ORAM (2011).

De acordo com o gráfico, o oxigênio dissolvido saturado tem o indicador de qualidade (I_Q) ao máximo partindo da referência 100% no eixo x. Com os valores obtidos de oxigênio abaixo de 100%, os resultados de I_Q possuem baixos índices impactados pela falta de oxigênio. No sentido contrário, valores superiores a 100% também diminuem a qualidade do indicador pelos efeitos do excesso de oxigênio na água. Para um $OD_{Sat}\%$ de 60, o indicador resulta em 57, enquanto para um valor de 140%, o indicador resulta em torno de 80.

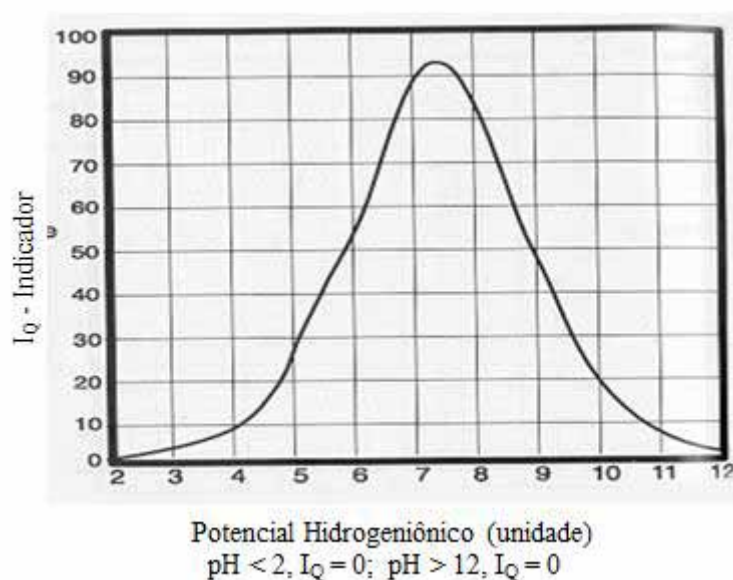
4.4.3 Potencial Hidrogeniônico

O potencial hidrogeniônico (pH) é um parâmetro que indica se a água avaliada é ácida ou alcalina (inferior a 7: condições ácidas; superior a 7: condições alcalinas). As alterações de pH podem ter origem natural, como a dissolução de rochas e a fotossíntese, ou antropogênica, que inclui os despejos domésticos e os industriais (BRASIL, 2006b).

Alterações nos valores de pH também podem aumentar o efeito de substâncias químicas que são tóxicas para os organismos aquáticos, tais como os metais pesados (BRASIL, 2015).

A Figura 28 mostra o indicador de qualidade em relação ao parâmetro pH.

Figura 28 – Gráfico - Indicador de qualidade: pH.



Fonte: ORAM (2011).

De acordo com o gráfico, o pH tem o indicador de qualidade (I_Q) ao máximo partindo da referência 7,3 no eixo x. Para um valor de 6, o pH direciona para o estado de acidez, obtendo um indicador de 89. No sentido contrário, para um valor de 8, o pH direciona para o estado alcalino e resulta no indicador de 83.

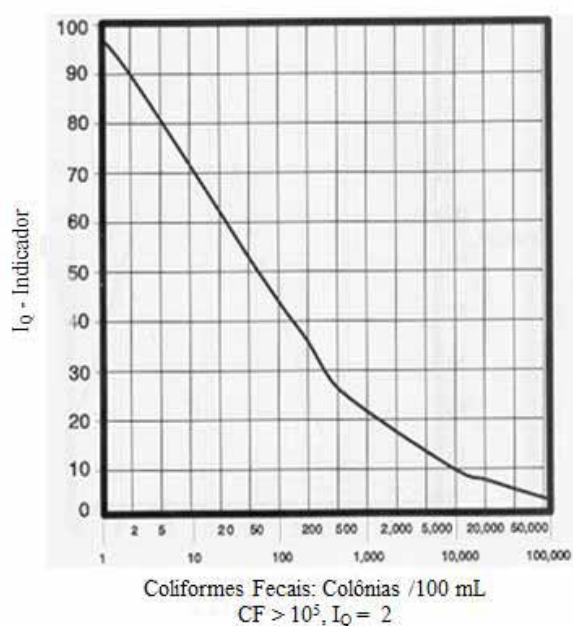
4.4.4 Coliforme Fecal

A bactéria Coliforme Fecal (CF) é um parâmetro que identifica, em uma amostra de água, o grau de contaminação por fezes, sendo causada por esgoto doméstico, uma vez que essa bactéria normalmente habita o intestino do ser humano. A maior parte das doenças

associadas com a água é causada pela transmissão via fecal (BRASIL, 2006b). Além disso, na legislação brasileira, os coliformes fecais são utilizados como padrão para qualidade microbiológica de águas superficiais destinadas ao abastecimento, recreação, irrigação e piscicultura (SÃO PAULO, 2009).

A Figura 29 ilustra o indicador de qualidade referindo-se ao parâmetro bactéria Coliforme Fecal.

Figura 29 – Gráfico - Indicador de qualidade: coliforme fecal.



Fonte: ORAM (2011).

De acordo com o gráfico, o Coliforme Fecal tem o indicador de qualidade (I_Q) ao máximo partindo da referência 1,0 no eixo x. Para um valor de 100 colônias/100mL, o indicador resulta em 43. Em valores superiores a 100.000 colônia/100mL, o indicador assume valor constante igual a 2.

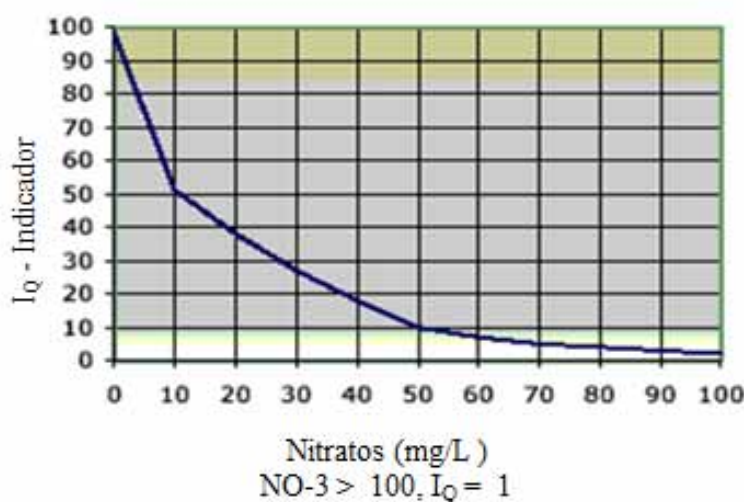
4.4.5 Nitratos

O gás mais importante do meio aquático é o oxigênio e a biota aquática pode ser formada por organismos aeróbios e/ou anaeróbios. Os aeróbios utilizam o oxigênio dissolvido para sua respiração e os anaeróbios respiram utilizando o oxigênio contido em moléculas de diversos compostos, como nitratos (NO_3), sulfatos (SO_4) e outros (BRASIL, 2006b).

Pelo fato dos compostos de nitrogênio serem nutrientes nos processos biológicos, seu lançamento em grandes quantidades nos corpos d'água, junto com outros nutrientes, como o fósforo, causa um crescimento excessivo das algas, processo conhecido como eutrofização, o que pode prejudicar o abastecimento público, a recreação e a preservação da vida aquática (BRASIL, 2015).

A Figura 30 mostra o indicador de qualidade em relação ao parâmetro Nitratos.

Figura 30 – Gráfico - Indicador de qualidade: nitratos.



Fonte: ORAM (2011).

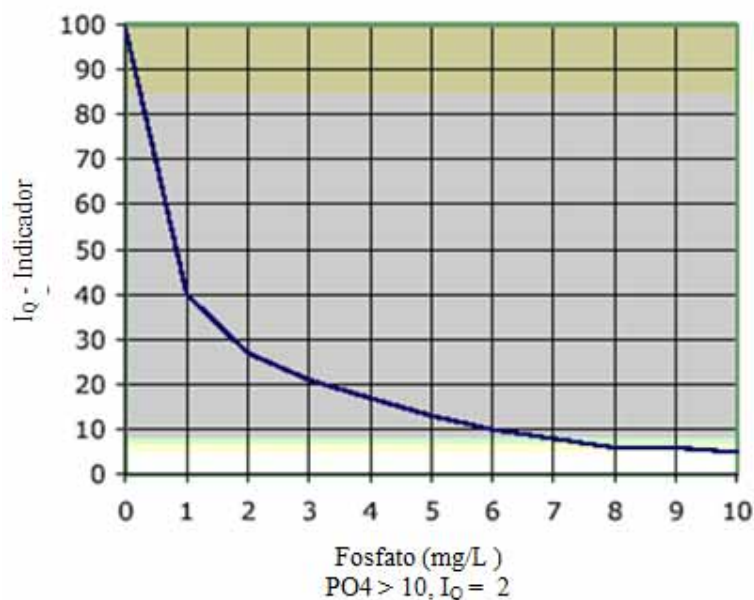
De acordo com o gráfico, os Nitratos têm o indicador de qualidade (I_Q) ao máximo partindo da referência zero no eixo x. Para um valor de 10 mg/L, o indicador resulta em 50. Para valores superiores a 100 mg/L, o indicador assume valor constante igual a 1.

4.4.6 Fosfato

O fósforo é o nutriente mais importante para o crescimento de plantas aquáticas; o fenômeno da eutrofização é conhecido como o crescimento em excesso dessas plantas. A presença de fósforo na água está relacionada a processos naturais, tais como a dissolução de rochas, carreamento do solo, decomposição de matéria orgânica e chuva, ou antropogênicos, através de lançamento de esgotos, detergentes, fertilizantes e pesticidas. As concentrações de fósforo situam-se na faixa de 0,01 mg/L a 0,05 mg/L para as águas naturais não poluídas (BRASIL, 2006b).

A Figura 31 refere-se ao indicador de qualidade do parâmetro fosfato (PO_4), sendo esse uma reação do fósforo com o oxigênio.

Figura 31 – Gráfico - Indicador de qualidade: fosfato.



Fonte: ORAM (2011).

De acordo com o gráfico, o Fosfato tem o indicador de qualidade (I_Q) ao máximo partindo da referência zero no eixo x. Para um valor de 1 mg/L, o indicador resulta em 40. Em valores superiores a 10 mg/L, o indicador assume valor constante igual a 2.

4.4.7 Demanda Bioquímica de Oxigênio

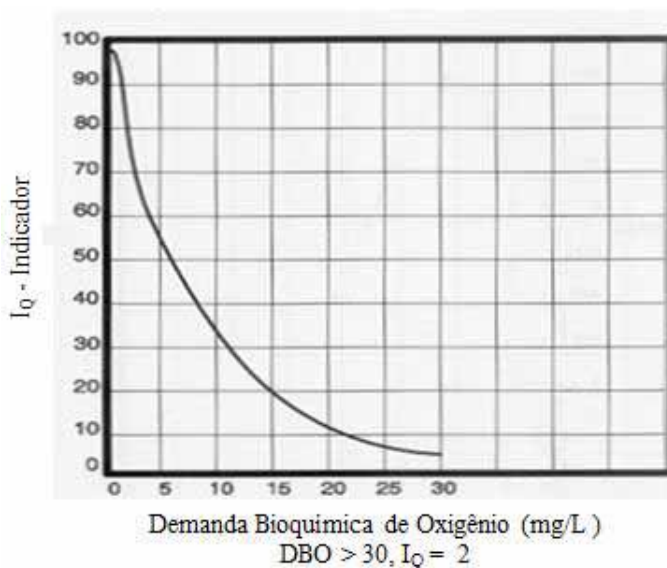
O parâmetro de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é um indicador de presença de matéria orgânica na água. A matéria orgânica é responsável pelo principal problema de poluição das águas, que é a redução na concentração de oxigênio dissolvido, como consequência da atividade respiratória das bactérias para a estabilização da matéria orgânica. Em ambientes naturais não poluídos, a concentração de DBO é baixa (1 mg/L a 10 mg/L), podendo atingir valores bem mais elevados em corpos d'água sujeitos à poluição orgânica, a qual, em geral, decorre do recebimento de esgotos domésticos ou de criadouros de animais (BRASIL, 2006b).

A Demanda Bioquímica de Oxigênio representa a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica presente na água através da decomposição microbiana aeróbia.

A DBO-5,20 é a quantidade de oxigênio consumido durante 5 dias em uma temperatura de 20°C. Valores altos de DBO-5,20 num corpo d'água são geralmente causados pelo lançamento de cargas orgânicas, principalmente esgotos domésticos. A ocorrência de altos valores desse parâmetro causa uma diminuição dos valores de oxigênio dissolvido na água, o que pode provocar mortandades de peixes e eliminação de outros organismos aquáticos (BRASIL, 2015).

A Figura 32 ilustra o indicador de qualidade referindo-se ao parâmetro Demanda Bioquímica de Oxigênio.

Figura 32 – Gráfico - Indicador de qualidade: demanda bioquímica de oxigênio (DBO).



Fonte: ORAM (2011).

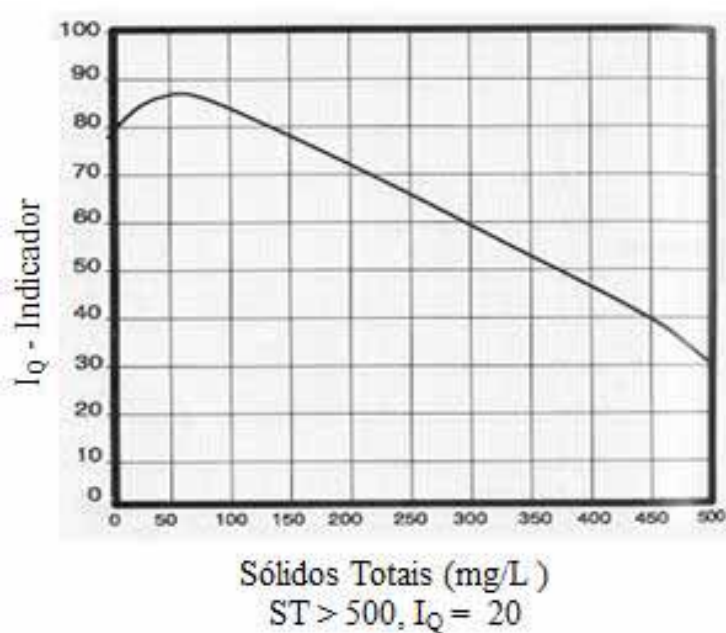
De acordo com o gráfico, a DBO tem o indicador de qualidade (I_Q) ao máximo partindo da referência zero no eixo x. Para um valor de 5 mg/L, o indicador resulta em 55. Para valores superiores a 30 mg/L, o indicador assume valor constante igual a 2.

4.4.8 Sólidos Suspensos

Sólidos em suspensão podem ser definidos como as partículas passíveis de retenção por processos de filtração. A entrada de sólidos na água pode ocorrer de forma natural (processos erosivos, organismos e detritos orgânicos) ou antropogênica (lançamento de lixo e esgotos). A alteração da penetração da luz na água decorre da presença de material em suspensão (BRASIL, 2006b).

Verifica-se através da Figura 33 que sólidos inferiores a 50 mg/L contribuem para a diminuição do indicador, pelo fato das partículas menores influenciarem na penetração da luz. Para valores superiores, o indicador tem o mesmo comportamento, pois partículas maiores podem acarretar processos erosivos e assoreamentos de reservatórios e, inclusive, causar a proibição para consumo humano.

Figura 33 – Gráfico - Indicador de qualidade: sólidos suspensos.



Fonte: ORAM (2011).

De acordo com o gráfico, os Sólidos Totais têm o indicador de qualidade (I_Q) ao máximo partindo da referência 65 mg/L no eixo x. Para um valor de 1 mg/L, o indicador resulta em 80. Em valores superiores a 500 mg/L, o indicador assume valor constante igual a 20.

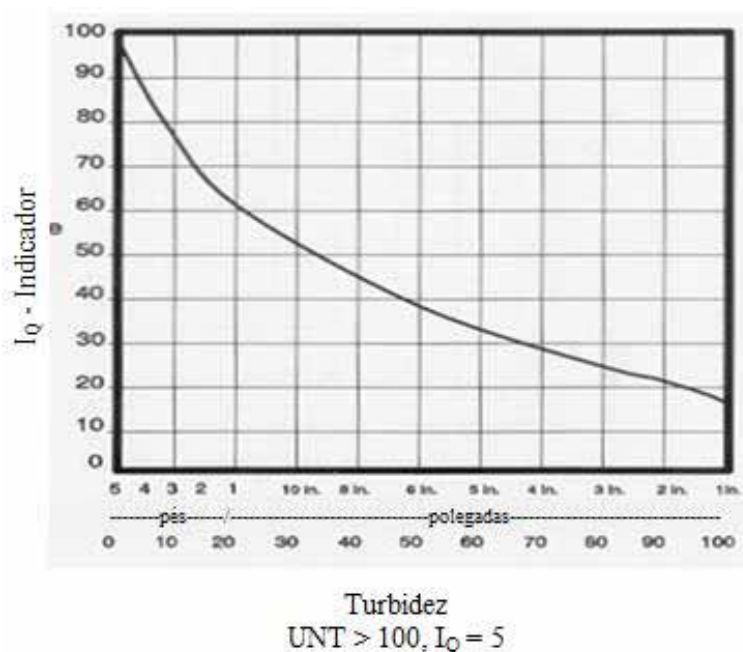
4.4.9 Turbidez

A turbidez pode ser definida como uma medida do grau de interferência à passagem da luz através do líquido. A alteração da penetração da luz na água decorre da presença de material em suspensão, sendo expressa por meio de unidades de turbidez (também denominadas unidades de Jackson (JTU) ou nefelométricas (UNT)) (BRASIL, 2006b).

A erosão dos solos é a principal fonte de turbidez, sendo que na época das chuvas as águas pluviais trazem uma quantidade significativa de material sólido para os corpos d'água. (BRASIL, 2015). Atividades de mineração, lançamento de esgotos e de efluentes industriais também são fatores que elevam a turbidez das águas (SÃO PAULO, 2009).

A Figura 34 mostra o indicador de qualidade referindo-se ao parâmetro Turbidez.

Figura 34 – Gráfico - Indicador de qualidade: turbidez.



Fonte: ORAM (2011).

De acordo com o gráfico, a Turbidez tem o indicador de qualidade (I_Q) ao máximo partindo da referência 5 pés no eixo x. Para um valor de 5 polegadas, o indicador resulta em 33. Na escala UNT, parte-se do máximo na referência zero. Quando medido o valor de 60 UNT, tem-se o valor de 33 para o indicador. Em valores superiores a 100 UNT, o indicador assume valor constante igual a 5.

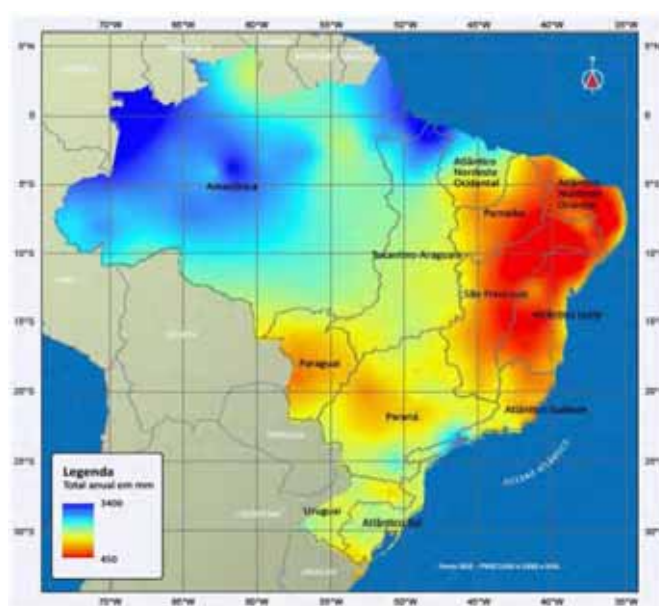
CAPÍTULO 5 ASPECTOS DE OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS

5.1 PERSPECTIVA DE OPERAÇÃO DOS FUTUROS RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS

A distribuição dos recursos hídricos no Brasil tem uma abordagem social, ambiental e produtiva, dada a escassez de um recurso valioso: a água. De acordo com a Agência Nacional de Águas (BRASIL, 2013a), o Brasil possui disponibilidade hídrica ainda satisfatória, quando comparado aos demais países informados pela Organização das Nações Unidas (ONU). Porém, cerca de 80% da disponibilidade hídrica brasileira está concentrada na região Amazônica, na qual o contingente populacional é menor e a demanda consuntiva é reduzida.

A Agência Nacional de Águas apresenta um relatório que analisa a precipitação média anual com base no histórico de 1961-2007. A média no período foi de 1.761 mm e identificou-se uma grande concentração de precipitação na região Amazônica, com mais de 3.000 mm, o que mostra a desigualdade na distribuição hídrica e a importância da gestão desse recurso (BRASIL, 2013a). A Figura 35 representa a precipitação anual no país, por bacias hidrográficas: Amazônica, Atlântico Nordeste Ocidental, Atlântico Nordeste Oriental, Parnaíba, Tocantins Araguaia, Paraguai, São Francisco, Atlântico Leste, Atlântico Sudeste, Paraná, Uruguai e Atlântico Sul.

Figura 35 – Precipitação anual no país.



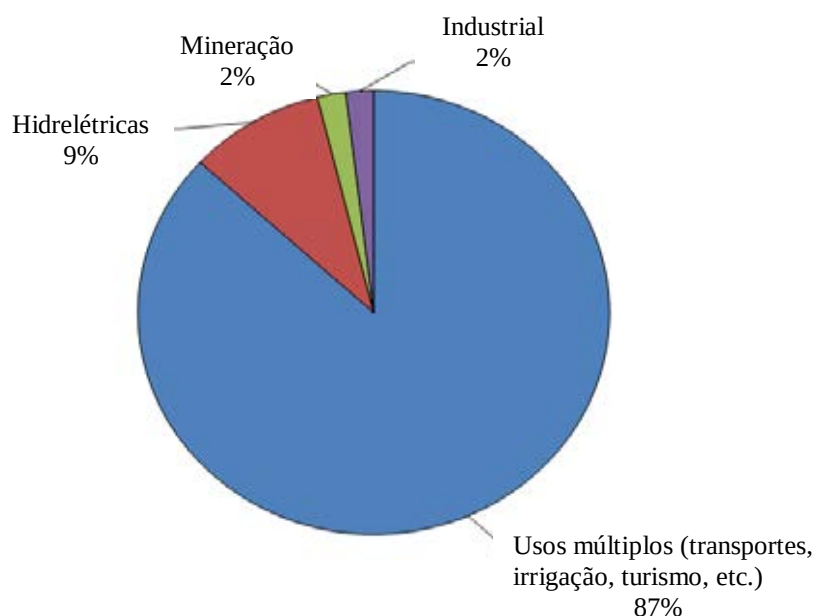
Fonte: BRASIL (2013a)

Tendo em vista que as maiores precipitações estão localizadas na bacia Amazônica e dada a importância do armazenamento de água para a compensação da sazonalidade entre os reservatórios, deve-se questionar a nova perspectiva de redução dos reservatórios para minimizar os impactos socioambientais, uma vez que o grande potencial hidrelétrico a ser explorado está na região Amazônica.

Observa-se que diante de outros setores, a participação das hidrelétricas no total de barragens instaladas no Brasil é pequena e a tentativa de diminuir o impacto das mesmas deve ser bem avaliada no âmbito de disponibilidade de armazenamento para uma matriz voltada para hidroeletricidade.

A divisão por setores usuários ou produtivos considera 11.748 barragens de usos múltiplos (transporte, irrigação, turismo, etc.), 1.261 de geração de energia elétrica, 264 de rejeitos de mineração e 256 de resíduos industriais. Apesar de muitas das barragens hidrelétricas propiciarem outros usos, as mesmas foram contabilizadas na estatística somente como uso de geração de energia (BRASIL, 2013a). A Figura 36 mostra o percentual de cada setor citado.

Figura 36 – Participação das hidrelétricas no total de barragens instaladas.

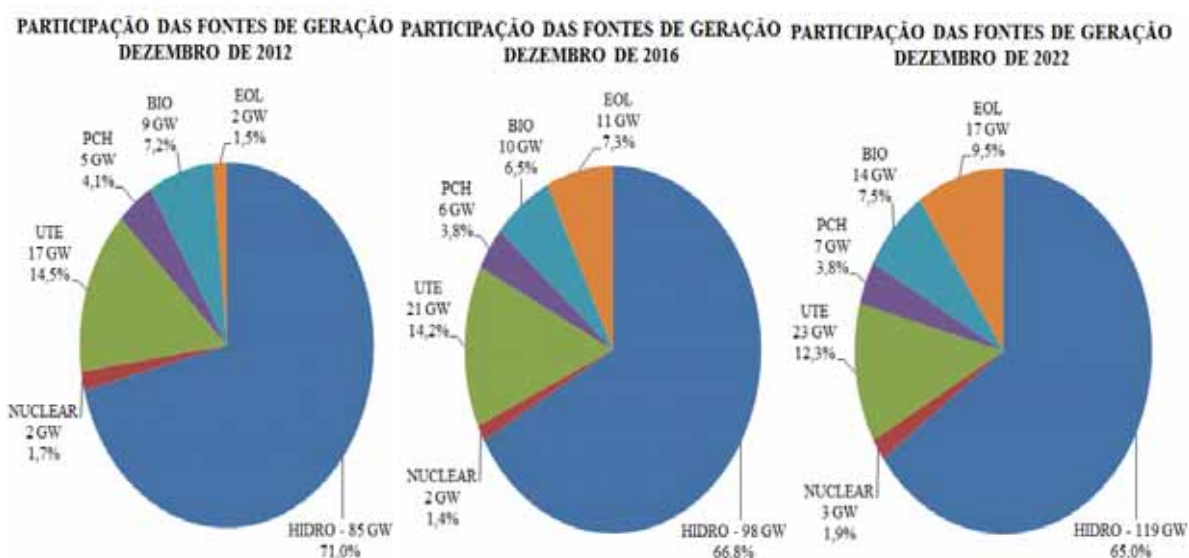


Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados de ANA (BRASIL, 2013a).

O Plano Decenal de Energia (PDE-2022) prevê um aumento na diversificação da matriz energética (BRASIL, 2013b). A Figura 37 mostra a participação reduzida das hidrelétricas nos cenários de dezembro de 2016 a dezembro de 2022 e um crescimento das

fontes renováveis (eólica e biomassa) e térmicas. As hidrelétricas (incluindo a PCH) reduzem a participação de 75%, correspondente a 90 GW (Giga-Watts), para 69%, correspondente a 126 GW.

Figura 37 – PDE 2022: evolução da capacidade instalada por fonte.

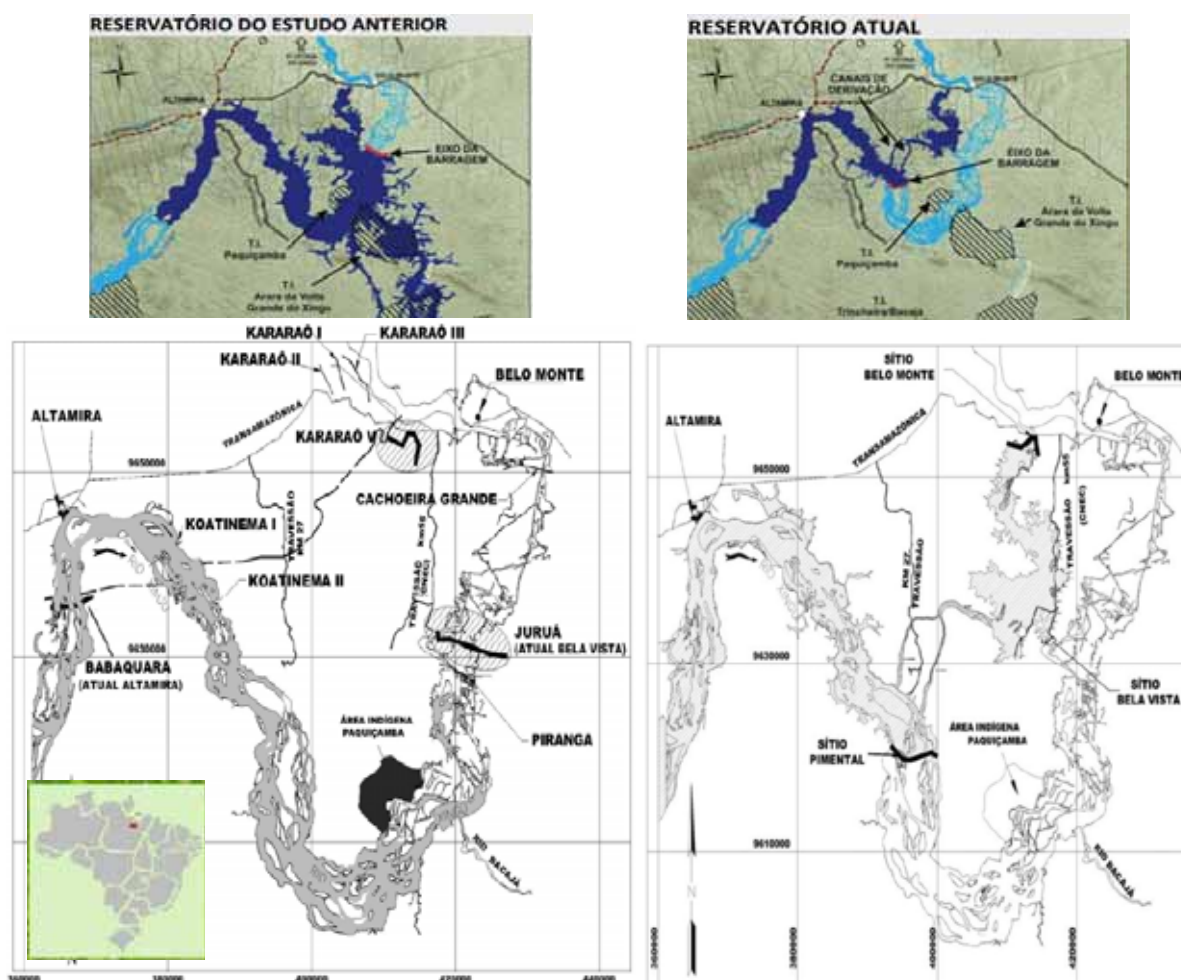


Fonte: EPE (2013).

Considerando-se a importância das hidrelétricas, os reservatórios são pontos de discussão no que tange aos impactos sociais e ambientais. A área alagada de reservatórios provoca remanejamento de pessoas e alagamento de grandes regiões e, por isso, existem estudos de viabilidade de projetos hidrelétricos que incluem a avaliação de redução do alagamento.

De acordo com o MME, cita-se como exemplo recente a hidrelétrica de Belo Monte, na qual a diminuição do reservatório e, conseqüentemente, da área alagada, foi a solução para reduzir os impactos sociais e ambientais (BRASIL, 2013b). A usina de Belo Monte está projetada para operar em regime a fio d'água, ou seja, usina que não possui reservatório ou necessita de pequeno volume de acumulação. Dessa forma, espera-se que o impacto socioambiental seja minimizado, juntamente com as emissões de GEE, uma vez que a densidade de potência está abaixo das maiores usinas hidrelétricas brasileiras. A Figura 38 ilustra as situações descritas anteriormente.

Figura 38 – Perspectivas de novos reservatórios: caso Belo Monte.



Fonte: Elaborada pelo autor com base em BRASIL (2011) e NETTO et al. (2007).

Segundo o MME, a área alagada do reservatório passa de 1.225 km² para 516 km², com uma densidade média de potência nacional de 0,05 km²/MW, inferior à média nacional de 0,49 km²/MW instalado e de outras usinas no Brasil, tais como, Serra da Mesa (1,40), Tucuruí (0,29) e Itaipu (0,10) (BRASIL, 2013b).

Com base nessas informações, deve-se observar os riscos na redução da capacidade do reservatório. Reservatórios menores diminuem a disponibilidade no armazenamento de água e podem colocar em risco o crescimento do país sob o ponto de vista da produção de energia elétrica, juntamente com o controle das vazões em período de cheias ao longo da bacia. Além disso, pode, ainda, afetar projetos que visam a aplicação do uso múltiplo da água.

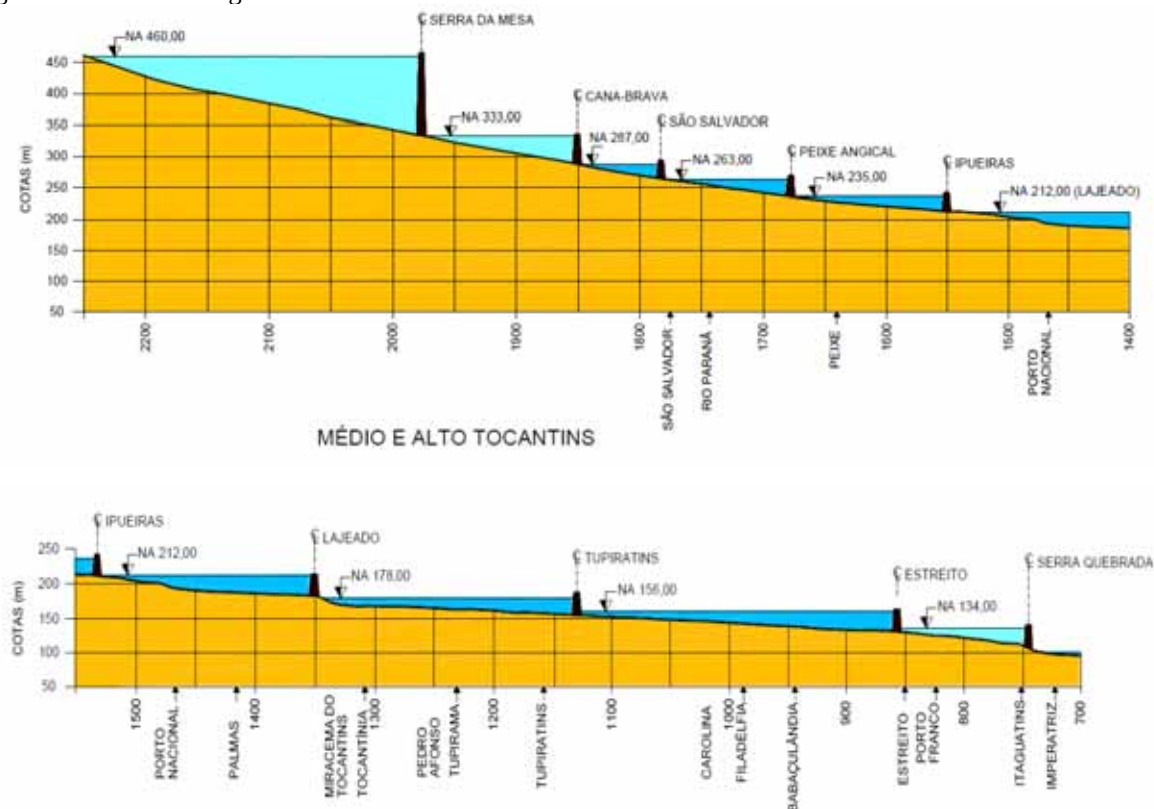
No caso do aumento da indisponibilidade de hidrelétricas, as soluções utilizadas em substituição às mesmas na geração de energia são as plantas termoeletricas, porém, os custos de produção são altos quando comparados à alternativa por hidrelétricas.

5.2 REGIME DE OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS

De acordo com o Atlas de Energia da ANEEL, os reservatórios têm por finalidade armazenar o volume de água necessário para a regularização da série de vazões do rio durante os períodos secos ou de chuvas e formar o desnível necessário para a configuração da energia hidráulica (BRASIL, 2008). Possuem uma importante função no regime de operação da planta hidrelétrica, estabelecendo os níveis (elevações) que permitem a produção de energia elétrica pelas turbinas hidráulicas e controlando/armazenando volume de água suficiente para regularizar a planta hidrelétrica e/ou a bacia hidráulica.

A Figura 39 mostra o reservatório da hidrelétrica de Serra da Mesa, o qual apresenta, como uma de suas finalidades, a regularização dos reservatórios a jusante. De acordo com a seção longitudinal da bacia do médio e alto Tocantins, verificam-se no eixo da abscissa as elevações sobre o nível do mar, em metros e, no eixo das ordenadas, as distâncias entre as barragens. Observa-se que os volumes das hidrelétricas ao longo da bacia são pequenos, quando comparados aos de Serra da Mesa, que está instalada na cabeceira do rio e acumula água para regularização das hidrelétricas a jusante.

Figura 39 – Estudo energético do médio e alto Tocantins.



Fonte: THEMAG (2013).

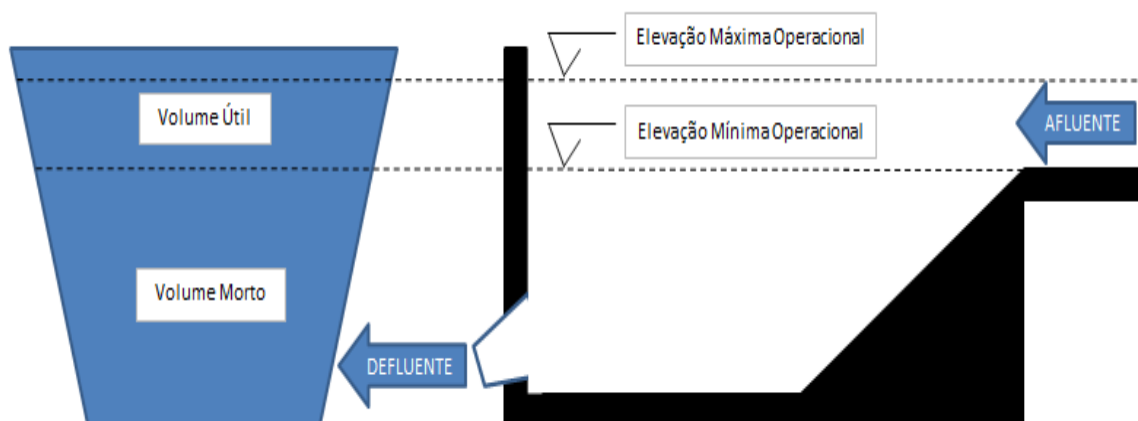
Basicamente, as elevações a montante de cada reservatório hidrelétrico são caracterizadas pelos limites dos volumes operacionais, a saber:

- Elevação máxima: corresponde ao volume máximo operacional do reservatório. Acima dessa elevação, dispositivos de seguranças são acionados (exemplo: comportas do vertedouro), de forma a garantir a segurança das estruturas hidráulicas;
- Elevação mínima: corresponde ao volume mínimo operacional do reservatório permitido e, normalmente, abaixo dessa elevação expõem-se as estruturas de tomada d'água ou alcançam-se os limites operacionais das turbinas.

Em elevações inferiores ao estabelecido como o mínimo, inicia-se o volume morto, que é a parcela não utilizada do reservatório, uma espécie de coletor de sedimentos de partículas carregadas pelas vazões afluentes. Pode-se alterar o volume ao longo do tempo em função do assoreamento (acúmulo de sedimentos no reservatório). Define-se o volume útil do reservatório através das elevações intermediárias entre a máxima e a mínima operacional.

A Figura 40 representa um esquema com as elevações e os respectivos volumes operacionais do reservatório.

Figura 40 – Volumes e elevações operacionais do reservatório.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3 ÁREA ALAGADA

A área alagada do reservatório relaciona-se com o volume de enchimento, o perfil geomorfológico e o regime de operação da planta hidrelétrica.

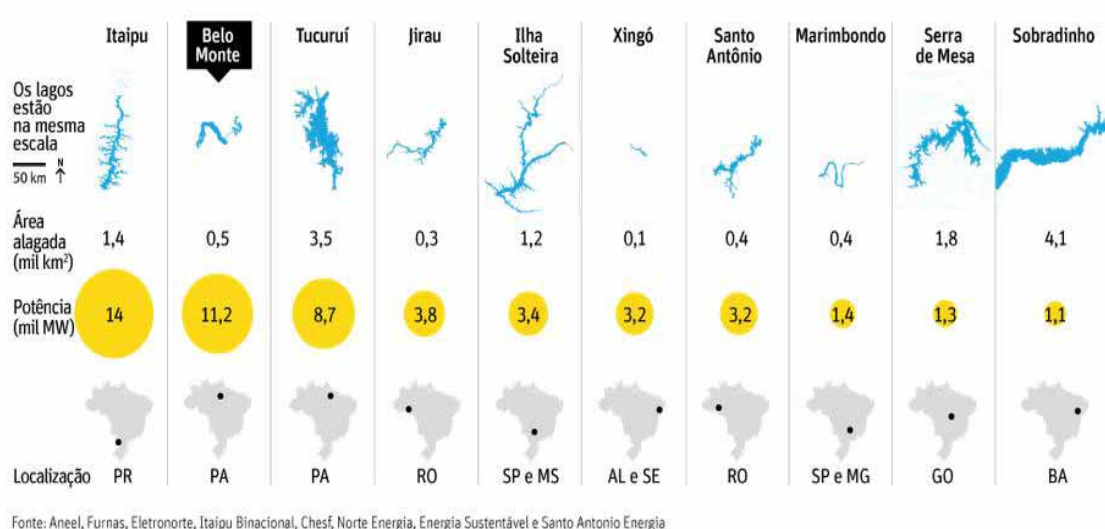
Fearnside (2008) considera o impacto do deplecionamento na qualidade da água através de estudos da inundação de reservatórios na região de florestas tropicais, situação que converge os nutrientes do solo para a bacia e faz com que uma biomassa de vegetação seja inundada após a mesma ficar exposta por certos períodos do ano (1 ou 2 meses).

O deplecionamento consiste no movimento sazonal do volume do reservatório, o qual é influenciado pelo regime operacional da usina e pelas vazões afluentes. A operação da usina estabelece quantas unidades geradoras devem operar com base na demanda de energia elétrica. As vazões afluentes impactam no balanço de entrada e saída de água dos reservatórios, incluindo as vazões das turbinas e as estruturas hidráulicas instaladas na barragem, o que resulta em maiores ou menores volumes que, por sua vez, alteram a área alagada e o deplecionamento.

Com relação às seções típicas de área alagada dos reservatórios, considera-se que existem duas condições do ponto de vista do porte da central hidrelétrica, que são: as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e as Médias e Grandes Centrais Hidrelétricas (MCH e GCH).

A Figura 41 apresenta seções típicas de área alagada por centrais hidrelétricas de grandes portes.

Figura 41 – Comportamento típico da área alagada de MCH/GCH.

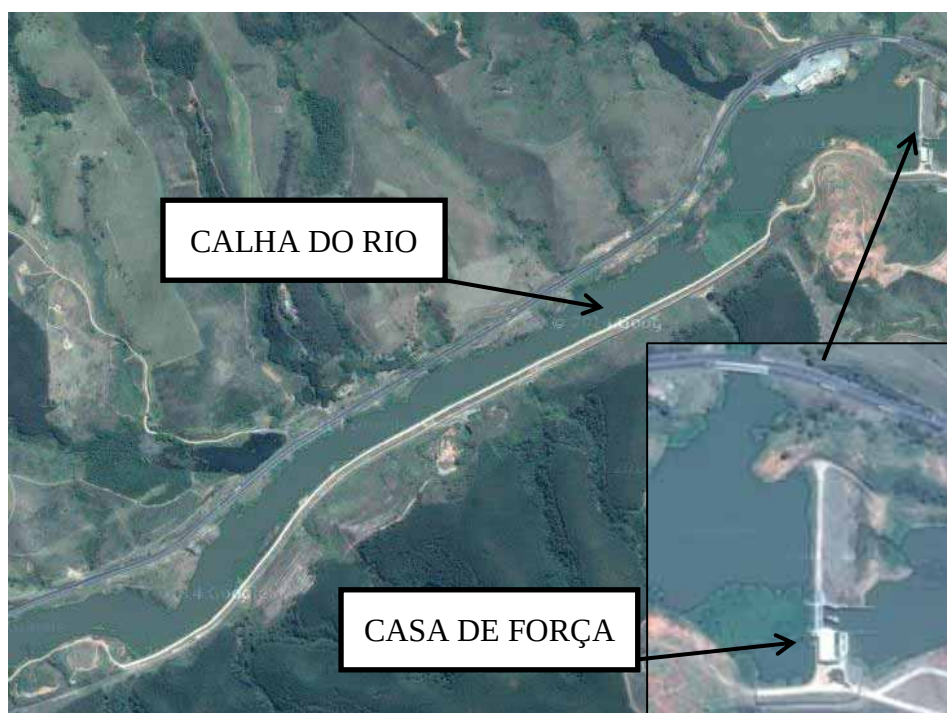


Fonte: LEITE (2013).

Normalmente, as PCH's não possuem superfícies espalhadas como as das MCH's/CGH's. Além do limite imposto pela ANEEL de 3 km², as pequenas centrais utilizam

a extensão da calha do rio para obter a regularização. A Figura 42 mostra foto da área da PCH Queluz, localizada no Estado de São Paulo.

Figura 42 – Comportamento típico da área alagada de PCH.



Fonte: GOOGLE MAPS (2015).

5.4 TEMPO DE RESIDÊNCIA

O tempo de residência mede o período médio de retenção da água no reservatório, sendo esse definido como a relação entre o volume do reservatório e a vazão afluente, de acordo com a Equação (3).

$$tr = \frac{Vr}{Q} \quad (3)$$

onde:

tr: tempo de residência [dias]

Vr: volume do reservatório [m³]

Q: vazão [m³/s]

Segundo Miller (2011), os lagos e os reservatórios são mais vulneráveis à contaminação por escoamento ou descarga de nutrientes do que os cursos d'água. Além disso, a diluição de poluentes é menos eficaz do que nos cursos d'água por dois motivos: possui um baixo fluxo, ou seja, o tempo de renovação é muito alto; e possui camadas estratificadas que passam por pouca mistura vertical.

Dependendo do tempo de residência, pode ocorrer o fenômeno da eutrofização do reservatório, sendo caracterizado pelo enriquecimento de nutrientes. Consequentemente, favorece o crescimento de algas e plantas flutuantes que, por sua vez, aumentam a turbidez da água e afetam o nível de oxigênio da mesma.

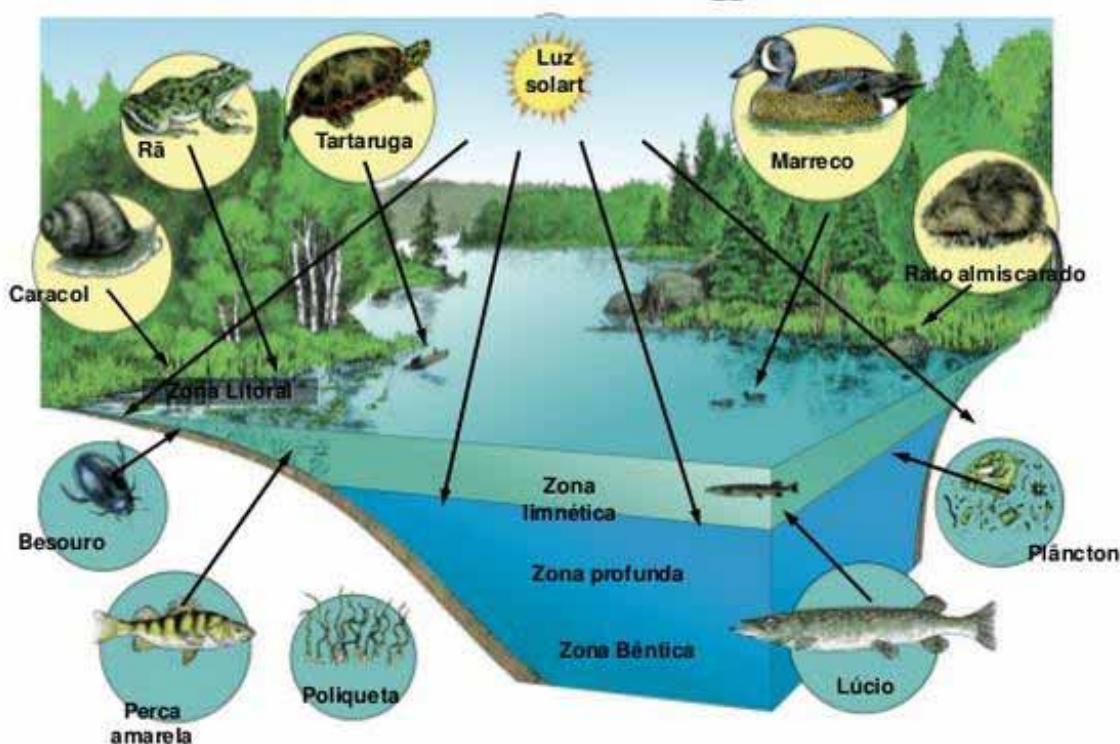
5.5 PERFIL VERTICAL DA QUALIDADE DA ÁGUA

Os reservatórios possuem basicamente quatro zonas distintas, de acordo com a profundidade e a distância das margens: litoral, limnética, profunda e bêntica (MILLER, 2011):

- Zona litoral: consiste em águas rasas iluminadas pelo Sol, próximas da margem até a profundidade, na qual as plantas com raízes param de crescer e apresentam uma grande diversidade biológica;
- Zona limnética: região ou camada de superfície de água aberta e iluminada pelo Sol; afastada da margem e se estende até a profundidade atingida pela luz solar. Como principal corpo fotossintético do lago, fornece o alimento e o oxigênio que sustentam a maioria da vida aquática;
- Zona profunda: água profunda e aberta, muito escura para fotossíntese; sem luz do Sol e sem as plantas, os níveis de oxigênio são baixos; os peixes adaptados à água mais fria e escura são encontrados nessa zona
- Zona bêntica: camada em que a maioria dos decompositores sobrevive de detritos e peixes que nadam de uma zona para outra. A zona é abastecida principalmente por detritos que caem da zona litoral (margem), limnética e por sedimentos que são arrastados para o reservatório.

A Figura 43 apresenta as quatro zonas mencionadas anteriormente.

Figura 43 – Zonas distintas do reservatório.



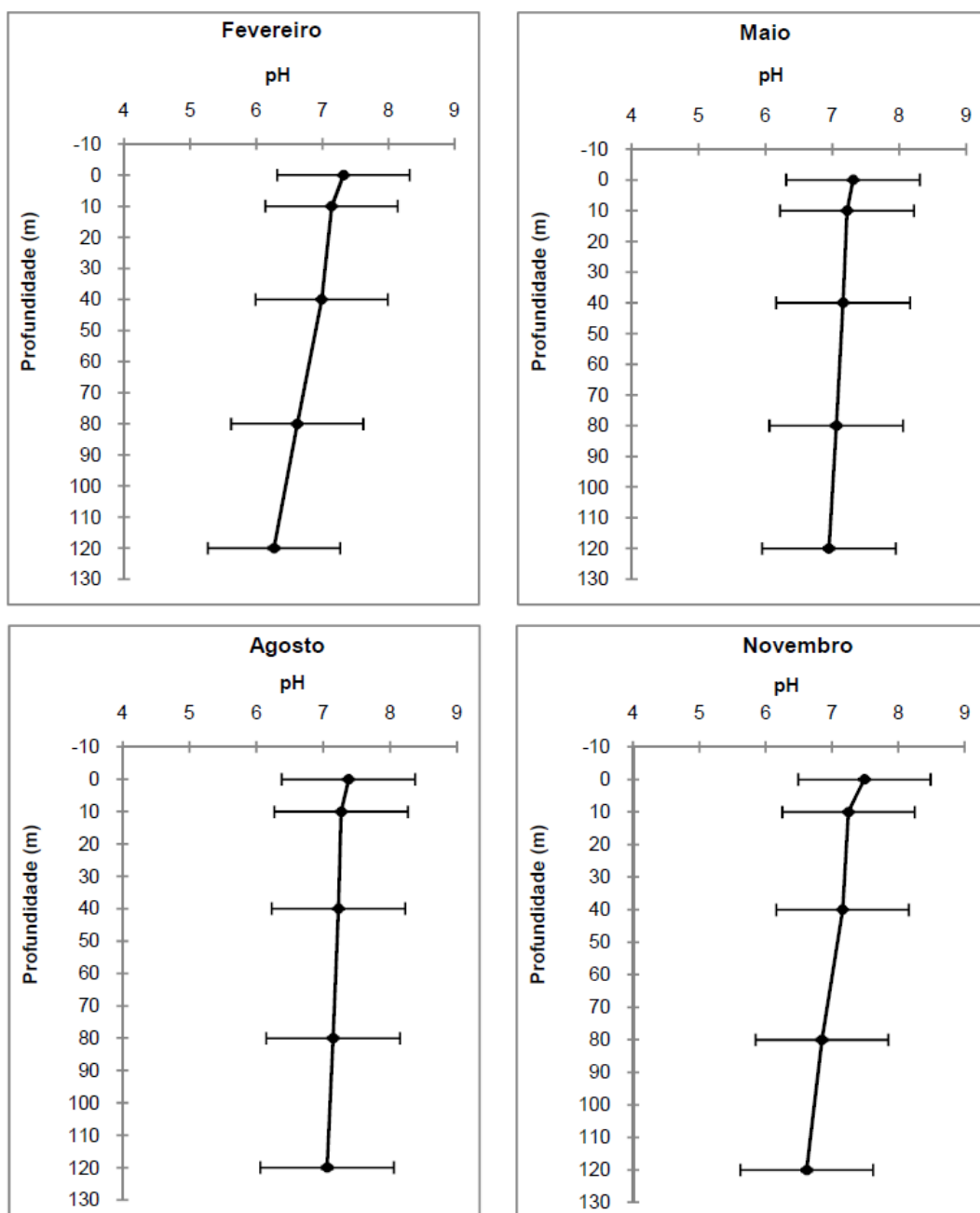
Fonte: MILLER (2011).

De acordo com Carvalho (2011), a usina Itaipu Binacional realiza monitoramento das águas do reservatório e dos principais rios da bacia hidrográfica do Paraná através de uma rede de monitoramento com 43 estações. Dentre as estações, cita-se a E5, localizada próxima à barragem.

Os parâmetros de qualidade da água da E5 possuem comportamentos distintos para cada camada (profundidade) ou perfil vertical. Como exemplo, na Figura 44 pode-se observar o parâmetro pH em função da profundidade com base nos meses de Fevereiro, Maio, Agosto e Novembro. Verifica-se que quanto maior a profundidade, menor é o valor do pH, ou seja, a água se torna mais ácida.

Ainda em Carvalho (2011), outras curvas são utilizadas para o perfil vertical da água, além da mencionada para o pH: temperatura da água, temperatura do ar, oxigênio dissolvido, oxigênio dissolvido saturado, demanda bioquímica de oxigênio, sólidos suspensos, pH, fosfato, nitrato, turbidez.

Figura 44 – Comportamento do pH em função da profundidade (Estação E5).



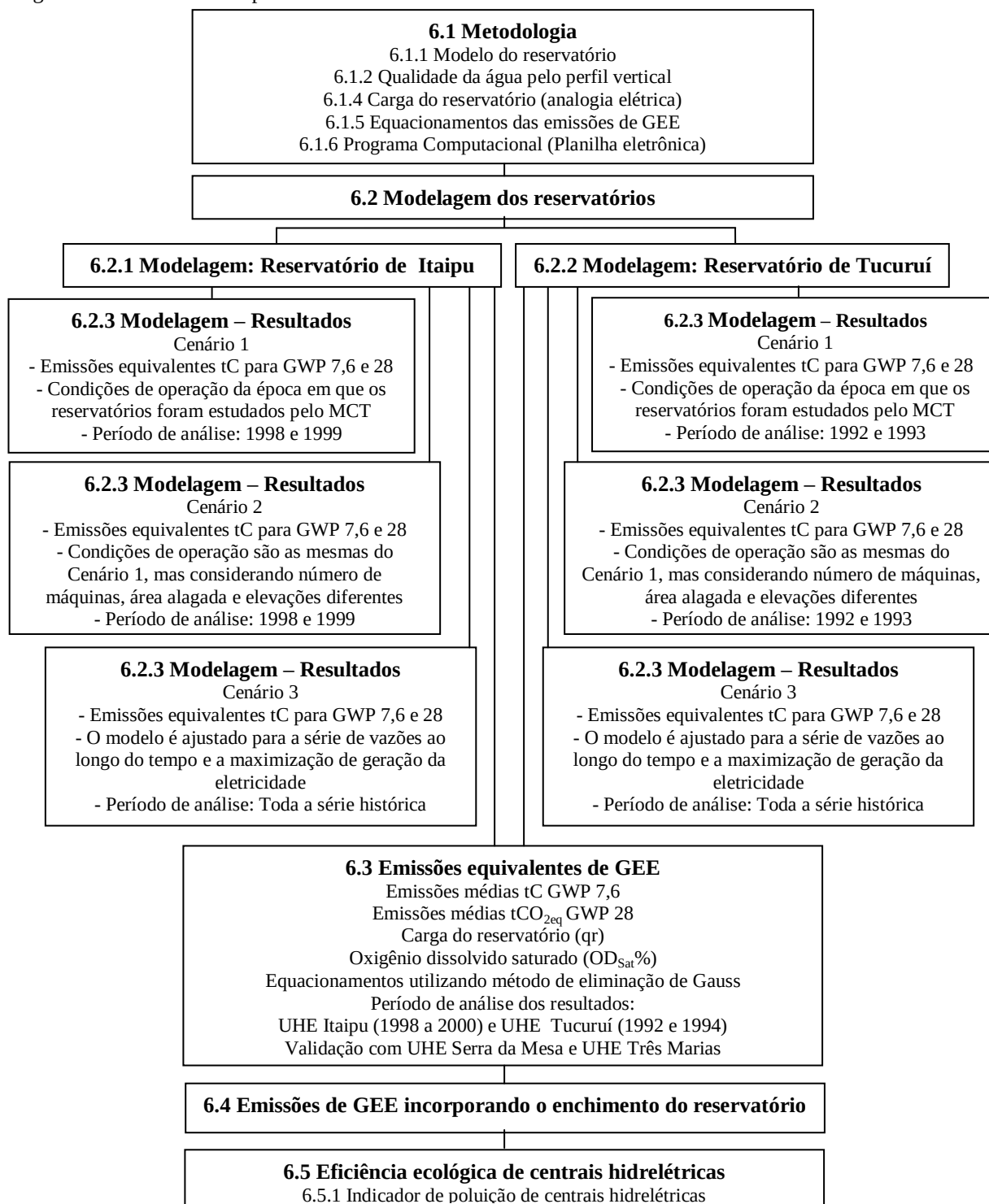
Fonte: CARVALHO (2011).

Louzada (2005) apresenta perfis verticais de estações localizadas nas proximidades do reservatório de Tucuruí. As curvas apresentadas pelos perfis são: temperatura da água, temperatura do ar, oxigênio dissolvido, oxigênio saturado, sólidos suspensos, pH, fosfato e nitrato.

CAPÍTULO 6 EFICIÊNCIA ECOLÓGICA DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

A figura 45 apresenta os itens que definem esse Capítulo, identificando o desenvolvimento desde a metodologia até a determinação da eficiência ecológica e o indicador de poluição.

Figura 45 – Estrutura do capítulo.



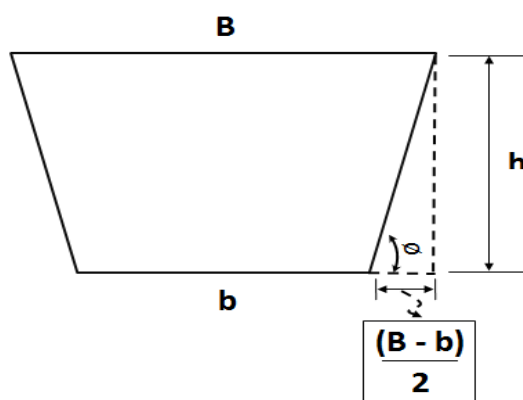
Fonte: Elaborada pelo autor.

6.1 METODOLOGIA

6.1.1 Modelo do reservatório

O modelo do reservatório realiza-se por meio de uma construção por seção de uma, figura plana relacionando o volume do objeto com a área alagada do reservatório. A Figura 46 apresenta essa figura plana, o trapézio, e suas relações.

Figura 46 – Seção típica do reservatório modelo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

onde:

B: base maior [m]

b: base menor [m]

h: altura do reservatório [m]

ϕ : ângulo do talude lateral [°]

O ângulo “ ϕ ” representa o talude lateral do modelo, sendo esse determinado pela Equação (4).

$$\phi = \text{ArcTan} \left(\frac{h}{\frac{B - b}{2}} \right) \quad (4)$$

onde:

ϕ : ângulo do talude lateral [°]

Arc Tan: Arco Tangente [-]

B: base maior [m]

b: base menor [m]

h: altura do reservatório [m]

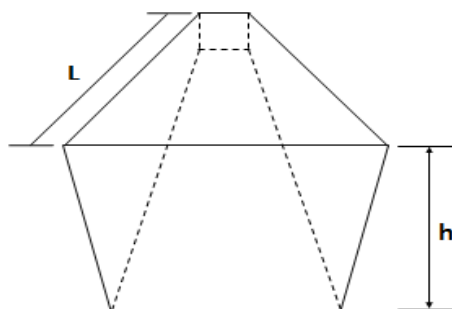
Uma vez determinada a relação do talude lateral do modelo, fixa-se o ângulo “ ϕ ”. Considerando-se que “b” é a cota do fundo do reservatório, tendo essa um valor fixo, determina-se nova altura “h” a cada variação de “B”.

Determina-se a área “S” do trapézio através da Equação (5).

$$S = \frac{B+b}{2} \times h \quad (5)$$

A Figura 47 mostra o volume do modelo trapezoidal.

Figura 47 – Volume típico do reservatório modelo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

onde:

L: comprimento [m]

h: altura [m]

A Equação (6) determina o volume do modelo através do produto da área da seção do trapézio com o comprimento “L”.

$$V_r = S \times L \quad (6)$$

onde:

V_r = volume do reservatório [m³]

S = área do trapézio [m²]

L = comprimento do reservatório [m]

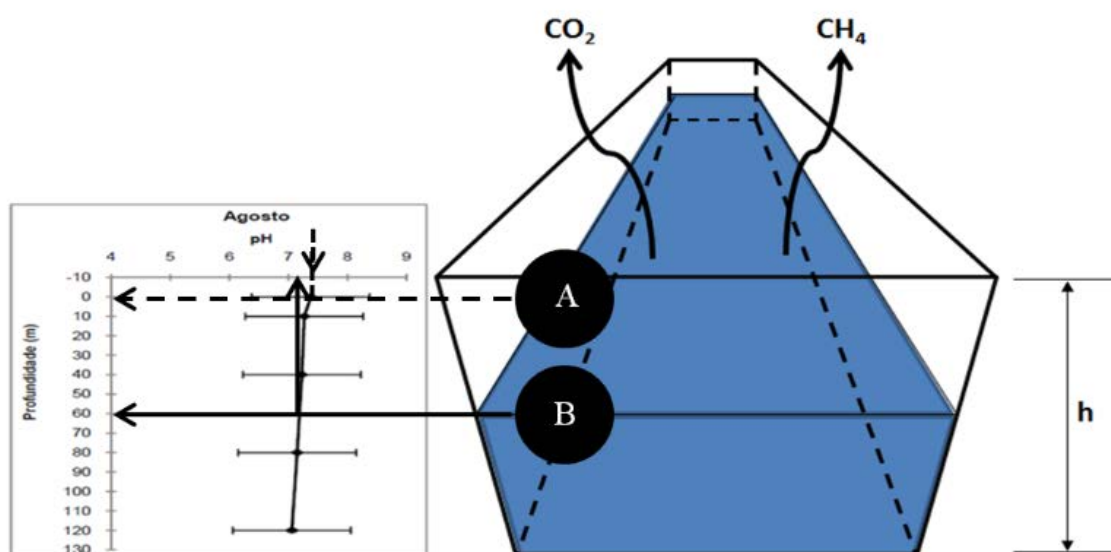
No momento do dimensionamento do reservatório, deve-se ajustar o modelo para obter os limites máximo e mínimo do volume útil do mesmo, ou seja, os limites operacionais da usina hidrelétrica.

6.1.2 Qualidade da água pelo perfil vertical

Com base no modelo do reservatório, na série mensal de vazões e nas informações de operação da usina hidrelétrica, realizam-se as interações que resultam em dados de comportamento do reservatório relacionados à área alagada e ao perfil vertical da qualidade da água. A área alagada determina as emissões de GEE e, os perfis verticais definem os indicadores da qualidade da água.

A Figura 48 ilustra a relação do modelo com as emissões de GEE e o perfil vertical.

Figura 48 – Reservatório: emissões de GEE e perfil vertical.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Considera-se que o modelo variou da condição A para a condição B, tendo em vista que nesta o volume de água é menor e, conseqüentemente, a área alagada e as emissões de CO₂ e de CH₄ são reduzidas.

As elevações de superfície do reservatório acompanham a alteração de volume, a qual altera o perfil vertical do parâmetro da qualidade. Na condição A, por exemplo, o pH possui um valor em torno de 7,4; na transição para B, o pH assume um valor de 7,2.

A qualidade da água é determinada pela somatória ponderada dos parâmetros físicos e químicos e seus respectivos pesos relacionados. Cada parâmetro possui um comportamento de perfil vertical em função da profundidade, sendo regido por polinômios definidos pelo histórico de monitoramentos realizados no reservatório.

O programa computacional (planilha dinâmica) considera as equações dos parâmetros de qualidade da água. Quando ocorrem variações de elevação a montante no reservatório, modifica-se o valor do parâmetro de acordo com a nova profundidade e conseqüentemente, altera-se o índice de qualidade do mesmo. Como as análises na planilha são mensais, há a necessidade de se obter equações em função do mês (janeiro a dezembro) para cada parâmetro e profundidade.

6.1.3 Parâmetros de regime de operação da usina hidrelétrica

O regime de operação da usina hidrelétrica e a série histórica de vazões influenciam no comportamento do reservatório. Os fluxos afluentes abastecem o reservatório, o qual altera seu volume quando considerado o consumo pelas turbinas (vazões turbinadas). Dessa forma, quando as vazões turbinadas forem superiores às do afluente, o volume tende a diminuir; quando ocorre o inverso, o volume aumenta. Define-se o consumo de água da usina hidrelétrica pela potência de cada turbina (produto da queda e da vazão) e pela quantidade de máquinas em operação. As elevações a montante (reservatório) e a jusante da casa de força (canal de fuga) são regidas, respectivamente, pelo volume do reservatório e pelas vazões turbinadas.

A Tabela 11 apresenta os parâmetros relacionados ao regime de operação da usina hidrelétrica.

Tabela 11 – Parâmetros de regime de operação da usina hidrelétrica

Parâmetros de Operação	Descrição	Unidade
Quantidade de Máquinas	Número de máquinas para os quais se dimensionou a planta hidrelétrica.	[-]
Potência Instalada	Somatória das potências disponíveis em cada máquina, obtida pelo produto da aceleração da gravidade, queda líquida, vazão e eficiência da turbina	[MW]
Queda Bruta	Diferença entre as elevações de montante (reservatório) e de jusante da casa de força (canal de fuga).	[mca]
Perdas Hidráulicas	Perdas ocorridas na passagem hidráulica pelo circuito hidráulico: tomada d'água, tubulação de adução e forçada, etc.	[mca]
Queda Líquida	Queda obtida quando deduzidas as perdas hidráulicas da queda bruta.	[mca]
Eficiência da Turbina	Razão de transformação da energia hidráulica para energia mecânica de eixo.	[%]
Elevações a Jusante	Nível do espelho d'água formado a jusante das turbinas (casa de força) e geralmente regido por Equação denominada curva chave de jusante.	[m-acima do nível do mar]
Volume do Reservatório	Volume definido com a finalidade de regularizar a geração nos períodos secos.	[m³ ou hm³]
Área Alagada	Área formada pelo espelho d'água no reservatório após enchimento e alterada pelo volume quando da operação da planta hidrelétrica.	[km²]
Elevações a Montante	Nível do espelho d'água formado a montante pela casa de força (reservatório) e geralmente regida pela variação do volume do reservatório.	[m-acima do nível do mar]

Fonte: Elaborada pelo autor.

A área alagada e as elevações a montante são dependentes do volume do reservatório, obtido pela diferença entre a vazão que entra pelo afluente e a vazão total de todas as turbinas. Quando se considera a série histórica de vazões e a quantidade de máquinas, tem-se o comportamento do volume ao longo do tempo.

A queda bruta é a diferença entre a elevação de montante com a elevação de jusante. Entre as estruturas do reservatório e a casa de força, existe um circuito hidráulico de adução composto pela tomada d'água, tubulações de baixa e alta pressão e estrutura de segurança que antecede a entrada da turbina (válvulas ou comportas). Incluem-se, ainda, as chaminés de

equilíbrio ou câmaras de carga, com a finalidade de minimizar os efeitos do Golpe de Ariete durante as demandas de carga pelo sistema elétrico ou eventual parada de emergência da unidade geradora por motivos de segurança.

Para obter a queda líquida da turbina, subtrai-se a perda de carga da queda bruta no circuito de adução. A perda de carga é definida pela Equação (7).

$$h^* = k^* \times \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

onde:

h^* : perda de carga em função da velocidade do escoamento [mca]

k^* : coeficiente de perda de carga [-]

v : velocidade do escoamento [m/s]

g : aceleração da gravidade [m/s^2]

Normalmente, a equação de perda de carga nos relatórios de estudos de viabilidade da hidrelétrica é determinada com base na vazão, por ser um dado disponível e que poder ser ajustado nos estudos de caso.

A Equação (8) define a vazão em função da área e da velocidade do escoamento.

$$Q = A \times v \quad (8)$$

onde:

Q : vazão [m^3/s]

A : área [m^2]

v : velocidade do escoamento [m/s]

Elevando ao quadrado os dois termos da Equação (8) e isolando o termo v^2 , obtém-se a Equação (9).

$$v^2 = \frac{Q^2}{A^2} \quad (9)$$

Substituindo a Equação (9) na Equação (7), tem-se a Equação (10), em função da área (A) e da vazão (Q).

$$h^* = k^* \times \frac{Q^2}{A^2 \times 2g} \quad (10)$$

onde:

h^* : perda de carga em função da velocidade do escoamento [mca]

k^* : coeficiente de perda de carga [-]

Q: vazão [m^3/s]

A: área [m^2]

g: aceleração da gravidade [m/s^2]

Na Equação (11) considera-se o K_p como a constante de carga de todo o circuito hidráulico e o Q_{Turb} como a vazão total das turbinas em operação.

$$h_p = K_p \times Q_{Turb}^2 \quad (11)$$

onde:

h_p : perda de carga em função da vazão turbinada [mca]

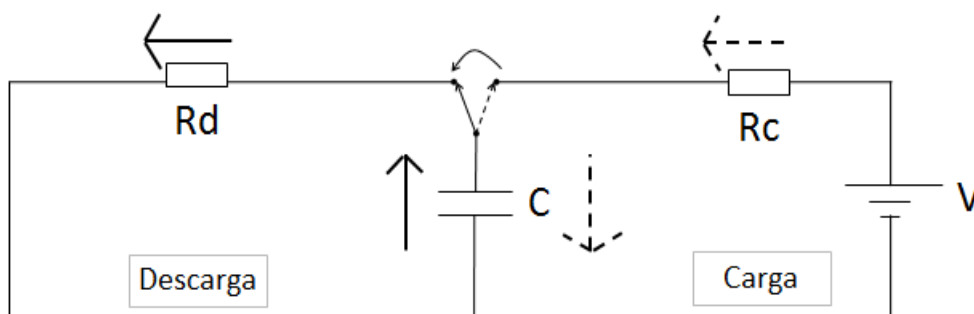
K_p : constante de perda de carga do circuito hidráulico [s^2/m^5]

Q_{Turb} : vazão turbinada [m^3/s]

6.1.4 Carga do reservatório: analogia elétrica

Realiza-se a analogia elétrica para a carga do reservatório considerando um circuito elétrico com resistor (R) e capacitor (C), denominado circuito RC. A Figura 49 apresenta duas condições de funcionamento: carga e descarga do capacitor.

Figura 49 – Circuito RC: carga e descarga do capacitor.



Fonte: Elaborada pelo autor.

onde:

Rd: resistência elétrica de descarga [Ω]

Rc: resistência elétrica de carga [Ω]

C: capacitância [F]

V: diferença de potencial [V]

O comportamento do reservatório é analisado sob o ponto de vista da carga elétrica de um capacitor, considerando que o mesmo está em constante descarga pelas turbinas hidráulicas durante a operação da hidrelétrica. A Equação (12) determina a descarga elétrica de um capacitor. Observa-se que o decaimento exponencial está em função da constante de tempo, que é o produto entre a resistência elétrica e a capacitância.

$$qc = C \times V \times e^{-td / Rd \times C} \quad (12)$$

onde:

qc: carga no capacitor [C]

C: capacitância [F]

V: diferença de potencial [V]

td: tempo de descarga do capacitor [s]

Rd: resistência elétrica de descarga [Ω]

Dessa forma, o reservatório é equivalente a um capacitor, sendo que a descarga elétrica está em função da diferença de potencial na elevação a montante do espelho d'água,

juntamente com a capacitância fluídica (seção transversal do reservatório) e do efeito exponencial dado pela constante de tempo, através da razão do tempo de residência pelo produto da resistência com a capacitância fluídica.

A capacitância fluídica é considerada como a transversal do reservatório e é determinada pela Equação (13).

$$C_f = \frac{V_r}{E} \quad (13)$$

onde:

C_f : capacitância fluídica do reservatório [m²]

V_r : volume do reservatório [m³]

E : elevação a montante [m-acima do nível do mar]

A resistência fluídica é equivalente ao regime de operação da turbina por meio da abertura e do fechamento do distribuidor, ou seja, considera a razão da queda líquida com a vazão turbinada, conforme Equação (14).

$$R_f = \frac{H_{liq}}{Q_{Turb}} \quad (14)$$

onde:

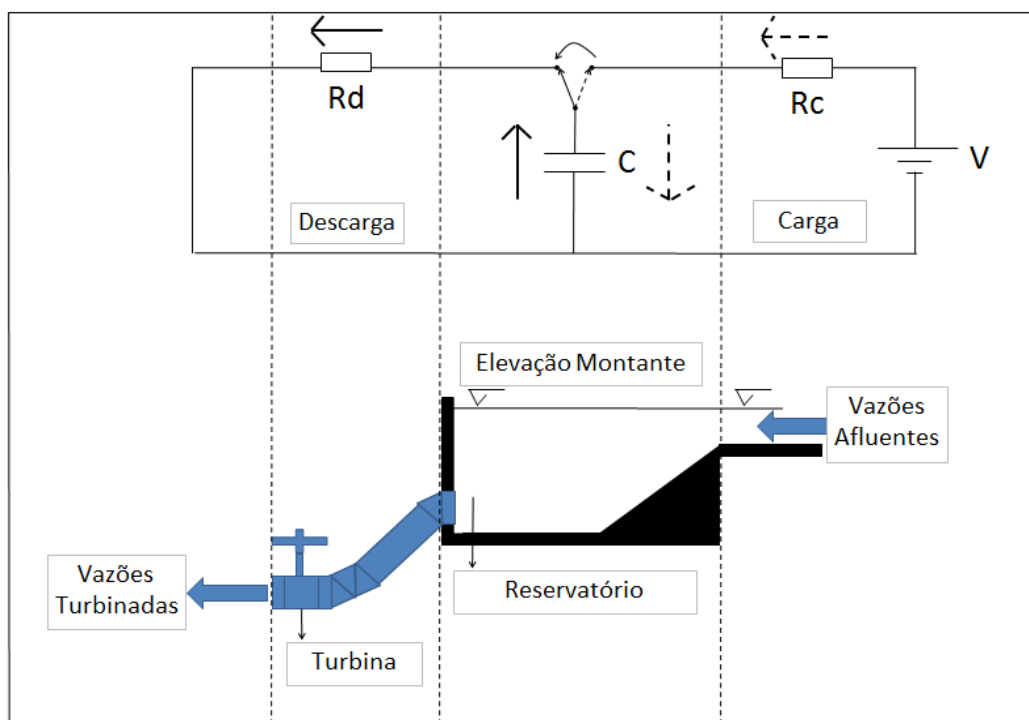
R_f : resistência fluídica [s/m²]

H_{liq} : queda líquida da turbina [m]

Q_{Turb} : vazão turbinada [m³/s]

A Figura 50 ilustra a analogia elétrica, relacionando os equipamentos mecânicos aos equipamentos hidráulicos correspondentes.

Figura 50 – Modelo elétrico do reservatório.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Dessa forma, descreve-se a Equação (15) da seguinte forma.

$$qr = C_f \times E \times e^{\frac{-tr \times 86400}{C_f \times R_f}} \quad (15)$$

onde:

qr: carga no reservatório [m³]

C_f: capacitância fluídica do reservatório [m²]

E: elevação a montante [m-acima do nível do mar]

tr: tempo de residência [dias]

R_f: resistência fluídica [s/m²]

6.1.5 Equacionamento das Emissões de GEE

Por meio do programa computacional, obtêm-se os resultados das emissões de CO₂ e CH₄ em função da área alagada do reservatório. Com base nestes, determinam-se as equações

das emissões equivalentes de tonelada de carbono (tC) e de tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO_{2eq}); a primeira tem a finalidade de auxiliar na análise dos resultados do MCT e, a segunda, na determinação do indicador de poluição de hidrelétricas.

Incluem-se nos equacionamentos das emissões equivalentes, parâmetros que melhor representem a parte de um todo sob o aspecto do regime operacional e ambiental, tendo como base variáveis práticas obtidas a partir de órgãos públicos, empresas de energia e trabalhos científicos.

Associa-se o reservatório a um modelo elétrico, o qual tem a carga influenciada pelo regime de operação da usina hidrelétrica. No aspecto ambiental, relaciona-se o oxigênio dissolvido saturado ($OD_{Sat\%}$) como parâmetro de qualidade da água, pois este possui uma relação direta com os fatores de influências locais, como a temperatura, o oxigênio dissolvido, a solubilidade do oxigênio e a pressão atmosférica.

Utiliza-se o método matemático de eliminação de Gauss com o intuito de determinar as equações das emissões equivalentes de toneladas de carbono (tC) e de toneladas de dióxido de carbono (tCO_{2eq}), com referência às duas variáveis: carga do reservatório e $OD_{Sat\%}$.

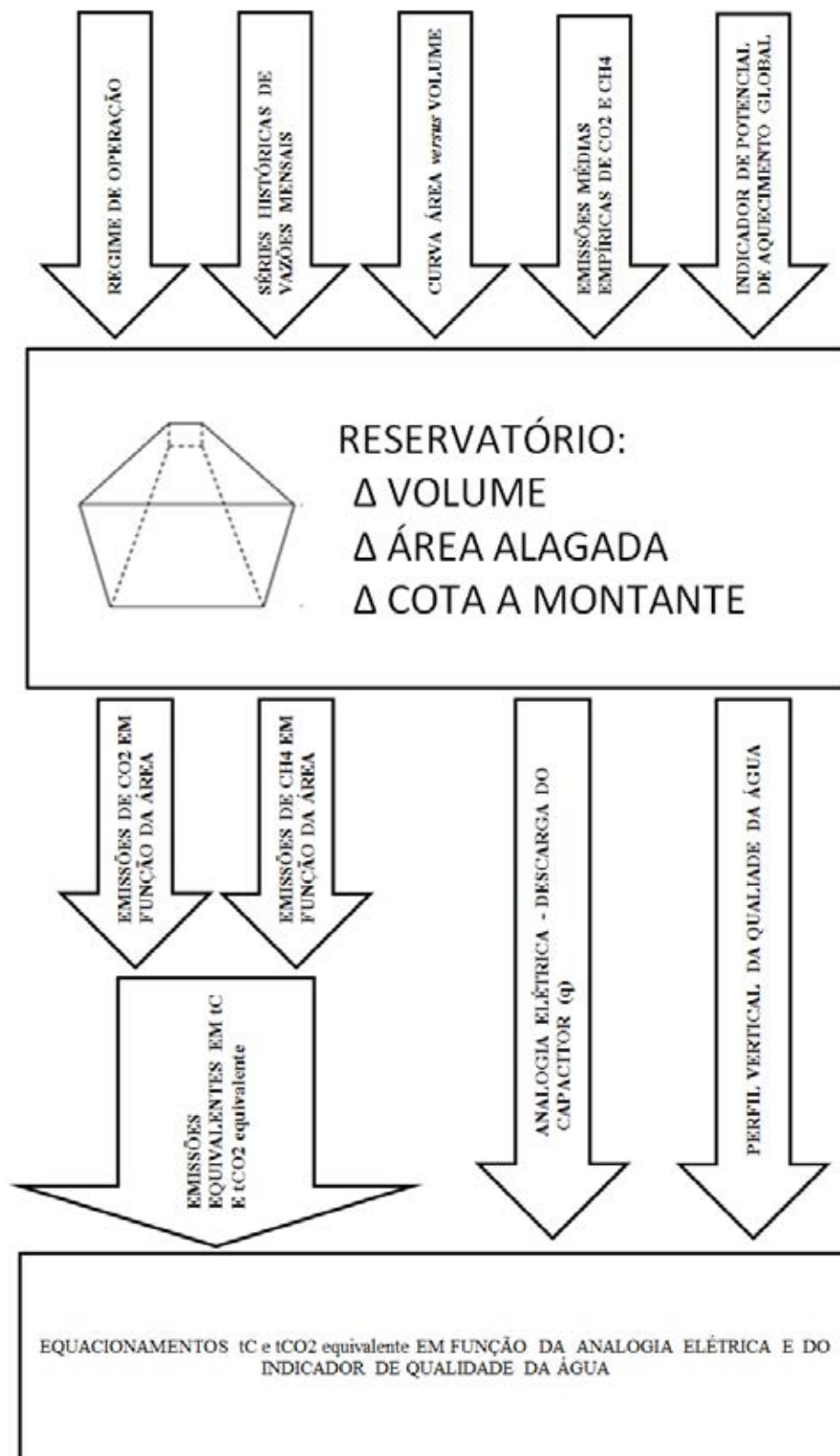
6.1.6 Programa Computacional (Planilha Eletrônica)

Com a finalidade de simular os modelos de reservatórios aplicados às usinas hidrelétricas, desenvolve-se uma planilha eletrônica dinâmica do Programa Excel®, que auxilia na realização dos cálculos de emissões de GEE em reservatórios hidrelétricos e na determinação do indicador de poluição, possibilitando, assim, a avaliação da eficiência ecológica de centrais hidrelétricas.

Devido à complexidade na interação dos parâmetros que influenciam no comportamento do reservatório, elaborar um programa computacional que auxilie nos cálculos entre as variáveis de interesse torna-se de suma importância. As hidrelétricas possuem uma complexidade operacional que, relacionada com questões ambientais, torna inviável a obtenção de resultados seguros sem a programação, com a qual é possível interagir o regime de operação da usina com as emissões de GEE (área alagada) e os perfis verticais (elevações a montante).

A Figura 51 apresenta os dados de entrada e de saída da planilha eletrônica, indicando as principais variáveis. Os dados de saída são utilizados para os equacionamentos da tC e tCO_2 .

Figura 51 – Dados de entrada e de saída da planilha eletrônica.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

A Figura 52 apresenta a estrutura básica do programa, o qual se divide nos seguintes temas:

- Aproveitamento: relacionam-se as informações referentes ao aproveitamento, tais como a série histórica de vazões e as elevações a montante;
- Turbina: destacam-se as informações sobre a vazão, a queda líquida operacional da turbina e a vazão turbinada em função do número de máquinas;
- Perdas Hidráulicas: consideram-se os dados relativos ao circuito hidráulico, tal como a equação da perda de carga;
- Reservatório: estabelecem-se os limites de operação do reservatório com base no modelo pré-definido;
- Geração: informações relativas à geração de energia, em Giga Watt-hora (GWh);
- Eficiência Ecológica: refere-se às informações na determinação da eficiência ecológica, tais como emissões de CO₂ e CH₄, área alagada e emissões equivalentes de tC e tCO₂;
- Qualidade da água: destacam-se os parâmetros de qualidade da água, totalizando nove parâmetros com os respectivos perfis verticais;
- Analogia Elétrica: relacionam-se os dados para a determinação da carga no reservatório pelo modelo elétrico análogo.

Figura 52 – Tela da planilha eletrônica dinâmica desenvolvida em Excel®

Otimizar		Aproveitamento				Turbina				91.810,87			
Sigla Unidade	Mês	Queda Bruta Hb m	Qmédio Qm m³/s	Velocidade v m/s	Consumo Qc m³/s	Qturbinada Qt m³/s	Qturbina Qt m³/s	Colina Colina m	Colina Queda Líquida Hl m	HQ	Nº Máq's	Eficiência	
	- Mensal												
	2		8.423,66		19.588,90	8.038,53	650,71		125,68				
Max.		126,08	31.630,00		42.814,38	14.400,00	720,00	125,68	125,68	90.463,76	20,00	97,68	
Med.		119,86	10.281,21		21.427,35	9.480,21	615,67	119,24	119,24	73.249,76	15,49	95,09	
Min.		61,87	2.839,00		9.273,38	2.839,00	362,83	61,77	61,77	29.306,05	4,00	88,82	
220,00	1	115,67	16.445,00	5,00	27.629,38	14.400,00	720,00	112,33	112,33	80.876,30	20	97,68	
220,00	2	115,67	21.715,00	5,00	32.899,38	14.400,00	720,00	112,33	112,33	80.876,30	20	97,68	
220,00	3	115,67	23.059,00	5,00	34.243,38	14.400,00	720,00	112,33	112,33	80.876,30	20	97,68	
220,00	4	115,67	16.537,00	5,00	27.721,38	14.400,00	720,00	112,33	112,33	80.876,30	20	97,68	
220,00	5	117,03	12.893,00	5,00	24.077,38	12.893,00	678,58	113,61	113,61	77.090,36	19	96,65	
220,00	6	118,88	10.841,00	5,00	22.025,38	10.841,00	677,56	115,34	115,34	78.152,41	16	96,63	

Perdas Hidráulicas				Reservatório									
Curva Chave m	Hs m	J m/km	Compr.Tub. km	Qdelta Qdelta m³/s	Cota Superior Brh m	Cota Inferior brh m	Altura hth m	Área Hidráulica Arh m²	Delta Área Hidráulica DArh m²	Comprimento Lrh m	Volume Vrh m³	Volume Excedente	
	(0,01)	1,25			9.000	1.100	180,30	910,515		31.850	28.999.902.750		
104,33	(0,00)	3,97		20.054,00	9.000,00	1.100,00	180,30	910,515,00	285.679,24	31.850,00	28.999.902.750,00	51.979.968.000,00	
99,90	(0,01)	0,62		801,01	8.930,09	1.100,00	178,65	896.165,15	(25,55)	31.567,28	28.910.641.416,67	2.076.213.833,53	
93,92	(0,03)	0,10		(7.065,00)	6.554,99	1.100,00	124,44	476.295,55	(421.816,60)	21.991,73	10.687.422.750,00	-	
104,33	(0,029)	3,35	1,00	2.045,00	8.941	1.100	178,89	898,112	-	31.611	28.999.902.750	5.300.640.000	
104,33	(0,029)	3,35	1,00	7.315,00	8.941	1.100	178,89	898,112	-	31.611	28.999.902.750	18.960.480.000	
104,33	(0,029)	3,35	1,00	8.659,00	8.941	1.100	178,89	898,112	-	31.611	28.999.902.750	22.444.128.000	

Aproveitamento - Geração		Eficiência Ecológica												
Potência Média Calculada	Energia	Área Inundada	Fator									13.676,59	86.400	
Pdem-c kW médio	Edem-d Gw.h	km²	CO2 kg/km²d média	CH4 kg/km²d média	tCO2Mês	(CO2)e ton/mês	tCO2Ano	tCO2Ano				Ano	Tempo de Residência Dias/Mês	Tempo de Residência Ano
15.898.989,55	139.275,15	1.349,99	171,00	20,80	15.156,46	24.615,72	181.877,58	181.877,58					113,05	9,42
10.480.692,36	91.810,87	1.345,76	171,00	20,80	15.108,98	24.538,60	181.307,18	181.307,18					7,39	0,62
3.315.790,47	29.046,32	482,29	171,00	20,80	5.414,72	8.794,08	64.376,58	64.376,58					-	-
15.483.995	135.640	1.350	171	20,8	15.156,46	24.615,72	181.307,76	181.877,58	1931				20,4	1,7
15.483.995	135.640	1.350	171	20,8	15.156,46	24.615,72	181.877,58	181.877,58					15,5	1,3
15.483.995	135.640	1.350	171	20,8	15.156,46	24.615,72	181.877,58	181.877,58					14,6	1,2

Qualidade da Água					Analogia Elétrica							
					Permanência					1000000	1000	100
OD-Sat %	OD-Sat %					t	R	C	V	q - Pontual	Nº Máq's	OD-Sat %
0,17	Q-Value	P-0	P-10	P-40	P-80	P120	seg			Mês	-	0,17
90,48	97,14	94,11	80,48	68,29	10,16	11,89	10.214.830,13	0,0090	131.816.975,90	220,00	2.317,85	20.000,00
86,77	93,37	94,11	80,48	68,29	10,16	11,89	3.477.325,67	0,0058	131.491.898,90	219,53	590,72	15.488,68
63,99	73,52	94,11	80,48	68,29	10,16	11,89	916.848,02	0,0027	64.557.028,05	-	5,10	4.000,00
86,73	93,30	93,30	82,68	73,52	31,09	30,41	1763448,02	0,00407	131816975,90	220,00	1.079,72	20.000,00
86,09	92,68	92,68	84,60	77,95	48,80	46,18	1335477,91	0,00341	131816975,90	220,00	1.491,79	20.000,00
85,65	92,25	92,25	86,24	81,58	63,29	59,19	1257639,22	0,00328	131816975,90	220,00	1.582,13	20.000,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

A estrutura completa da planilha eletrônica é composta por 145 colunas com diversas informações relacionadas ao regime de operação, modelo de reservatório, área alagada, parâmetros da qualidade, modelo elétrico análogo para a carga do reservatório, eficiência ecológica, entre outras. O número de linhas dependerá da quantidade de meses indicada na série histórica de vazões, sendo que séries antigas podem alcançar cerca de 1.000 registros.

6.2 MODELAGEM DOS RESERVATÓRIOS

Desenvolve-se uma modelagem de reservatório e analisa-se o comportamento das emissões de GEE com o regime de operação ao longo do tempo, considerando o histórico de vazões disponibilizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (BRASIL, 2011). A modelagem é baseada em duas importantes hidrelétricas, localizadas em diferentes regiões do país: Itaipu (Estado do Paraná) e Tucuruí (Estado do Pará).

As condições geomorfológicas dos reservatórios dessas hidrelétricas são diferenciadas. Itaipu possui um reservatório de grande altura e uma largura média de sete mil metros, além de um regime operacional em que as elevações são mais estáveis, característico de usina a fio

d'água. Tucuruí apresenta um reservatório de altura menor, com largura média de oito mil metros, e uma sazonalidade maior, que faz que o regime do reservatório opere com grandes deplecionamentos. Em usinas hidrelétricas, o deplecionamento faz com que os nutrientes e outras formas orgânicas sejam trazidos para o interior do reservatório quando a área alagada é reduzida. Quando o reservatório aumenta seu volume, a área alagada cobre as regiões anteriormente expostas, inundando as vegetações que cresceram no local.

Considera-se o modelo de reservatório do tipo estático, com variações mensais correspondentes aos meses da série histórica de vazões, e verifica-se o comportamento das emissões de GEE ao longo do período em função do regime operacional da usina hidrelétrica e da área alagada.

6.2.1 Modelagem: reservatório de Itaipu

Estrutura-se o reservatório da planta hidrelétrica de Itaipu com base no modelo apresentado e nos parâmetros de operação indicados na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros de operação: Itaipu.

Parâmetros de Operação	Variável do Parâmetro	Valor	Unidade
Quantidade de Máquinas		20	[-]
Potência Instalada		14.000	[MW]
Elevações a Jusante	Normal	104,00	[m-acima do nível do mar]
	Máximo	142,15	[m-acima do nível do mar]
	Mínimo	92,00	[m-acima do nível do mar]
Volume do Reservatório	Normal	29×10^9	[m ³]
	Útil	19×10^9	[m ³]
Área Alagada	Normal	1.350	[km ²]
	Máxima de Cheia	1.561	[km ²]
	Mínimo Excepcional	459	[km ²]

Elevações a Montante	Normal	220,30	[m-acima do nível do mar]
	Máximo de Cheias	223,10	[m-acima do nível do mar]
	Mínimo Excepcional	197,00	[m-acima do nível do mar]

Fonte: Elaborada pelo autor com base em ITAIPU (2014).

Ajustam-se as dimensões do modelo com base nas informações dos volumes operacionais e das respectivas áreas alagadas. A Tabela 13 apresenta os valores de dimensionamento do modelo do reservatório.

Tabela 13 – Dimensões do modelo do reservatório de Itaipu.

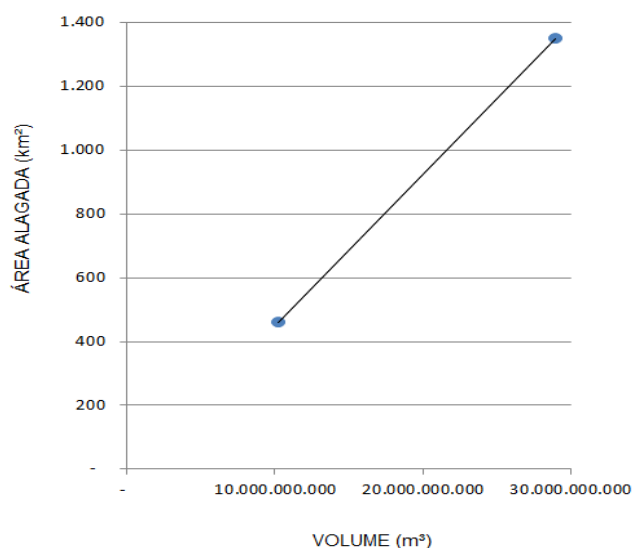
Dimensões	Operacional 1	Operacional 2	Operacional 3	Unidade
B	9.000	7.700	6.400	[m]
b	1.100	1.100	1.100	[m]
h	180,00	150,38	120,76	[m]
S	909.000	661.671	452.848	[m ²]
L	32.500	27.152	21.804	[m]
Volume	29.542.500.000	17.965.620.894	9.873.808.284	[m ³]

Fonte: Elaborada pelo autor.

As condições operacionais 1, 2 e 3 foram estabelecidas para limitar o regime de operação e os volumes máximos e mínimos do reservatório; quando superado o volume máximo, o programa computacional pressupõe que existe um excedente, sendo esse um volume d'água a se dissipar pelas estruturas de barragem (vertedouro); no volume mínimo, faz-se um ajuste no número de máquinas para que o mesmo não seja ultrapassado, e, se o consumo de água pelas turbinas não superar a vazão afluente, converte-se o excedente para volume armazenado no reservatório.

Com relação à área alagada, o modelo relaciona o volume a uma curva “área alagada *versus* volume” que, junto com as emissões equivalentes de CO₂ e CH₄ informadas pelo MCT (BRASIL, 2006a), determina as emissões equivalentes de poluentes em tC e tCO₂. A Figura 53 mostra a curva da área alagada em função do volume do reservatório.

Figura 53 – Área alagada x Volume: Itaipu.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com relação à perda de carga no circuito de adução, considera-se um percentual de 3% da queda bruta (SIQUEIRA, 2006) e determina-se o fator K_p em função da vazão da turbina, conforme Equação (16).

$$h_p = K_p \times Q_{Turb}^2 \quad (16)$$

onde:

h_p : perda de carga em função da vazão turbinada [mca]

Q_{Turb} : vazão turbinada [m³/s]

K_p : constante de perda de carga do circuito hidráulico = 0,000025 [s²/m⁵]

Determina-se a queda bruta pela diferença entre a elevação de montante com a de jusante, as quais se obtêm, respectivamente, na superfície do espelho d'água no reservatório e no canal de fuga a jusante da casa de força. O regime operacional do reservatório influencia as elevações de montante e as de jusante. Estas últimas são determinadas por uma curva denominada “curva de jusante”, a qual está em função da vazão turbinada. Na Tabela 14, indicam-se as elevações de jusante e as vazões turbinadas.

Tabela 14 – Elevações de jusante e vazões turbinadas: Itaipu.

Condição	Elevação de Jusante (m-acima do nível do mar)	Vazão Turbinada (m³/s)
Mínima (1 unidade)	104,00	700
Máxima (20 unidades)	92,00	14.000

Fonte: Elaborada pelo autor.

Inclui-se o perfil vertical da qualidade da água considerando a profundidade do corpo d'água no momento da operação do reservatório. O parâmetro de qualidade da água da superfície até o fundo é alterado e deve ser analisado dentro de um regime operacional da hidrelétrica, o qual altera a altura da coluna d'água e, em consequência, expõe a superfície do reservatório (ar-água) a um novo estado da qualidade da água.

Carvalho (2011) apresenta uma série de monitoramentos dos parâmetros de qualidade de água no reservatório de Itaipu. Neste trabalho, utilizam-se os dados da estação E5, por estar a 15 km da barragem. A periodicidade de coleta dos dados foi mensal entre 1985 e 1991, semestral em 1992 e, a partir de 1994, passou a ser trimestral. Os meses de referência são fevereiro, maio, agosto e novembro.

Extraem-se os dados dos gráficos apresentados por Carvalho (2011) e elaboram-se curvas nas quais são obtidos polinômios para cada faixa de profundidade, com vista a alcançar valores mensais do respectivo parâmetro. Esses polinômios têm como variável de entrada todos os meses do ano, sendo esses referenciados de 1 a 12 (janeiro a dezembro). Os polinômios referentes aos parâmetros da qualidade da água são apresentados através das Tabelas 15 a 24, os quais fazem parte da interação no modelo.

Tabela 15 – Polinômio: temperatura da água.

Profundidade	Polinômio	Y (Parâmetro)	X (Mês)	R²
P-0	$y = 0,2861x^2 - 4,0694x + 36,619$	[°C]	1-12	0,8039
P-10	$y = 0,2639x^2 - 3,8139x + 35,297$	[°C]	1-12	0,7351
P-40	$y = 0,2778x^2 - 4,0644x + 34,958$	[°C]	1-12	0,9368
P-80	$y = 0,1583x^2 - 2,7617x + 31,405$	[°C]	1-12	0,9387

P-120	$y = -0,0028x^2 - 0,2072x + 21,521$	[°C]	1-12	0,3524
-------	-------------------------------------	------	------	--------

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 16 – Polinômio: temperatura do ar.

Profundidade	Polinômio	Y (Parâmetro)	X (Mês)	R ²
-	$y = 0,3569x^2 - 4,6686x + 36,912$	[°C]	1-12	1,000

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 17 – Polinômio: oxigênio dissolvido.

Profundidade	Polinômio	Y (Parâmetro)	X (Mês)	R ²
P-0	$y = -0,0417x^2 + 0,625x + 5,7917$	[mg/L]	1-12	0,7368
P-10	$y = -0,0542x^2 + 0,8025x + 5,0192$	[mg/L]	1-12	0,8901
P-40	$y = -0,0778x^2 + 1,0844x + 4,0622$	[mg/L]	1-12	0,9451
P-80	$y = -0,1681x^2 + 2,3697x - 0,3247$	[mg/L]	1-12	0,9999
P-120	$y = -0,1306x^2 + 1,9339x + 0,3894$	[mg/L]	1-12	0,9896

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 18 – Polinômio: oxigênio saturado.

Profundidade	Polinômio	Y (Parâmetro)	x (Mês)	R ²
P-0	$y = 0,0972x^2 - 0,9139x + 94,114$	[%]	1-12	0,8023
P-10	$y = -0,1389x^2 + 2,3389x + 80,478$	[%]	1-12	0,8562
P-40	$y = -0,3972x^2 + 5,6206x + 68,293$	[%]	1-12	0,9990
P-80	$y = -1,6111x^2 + 22,544x + 10,156$	[%]	1-12	0,9868
P-120	$y = -1,375x^2 + 19,892x + 11,892$	[%]	1-12	0,9992

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 19 – Polinômio: demanda bioquímica de oxigênio.

Profundidade	Polinômio	Y (Parâmetro)	x (Mês)	R ²
P-0	$y = -0,0014x^2 - 0,0183x + 1,7756$	[mg/L]	1-12	0,7279

P-10	$y = -0,0183x^2 + 0,195x + 1,2783$	[mg/L]	1-12	0,5173
P-40	$y = -0,0208x^2 + 0,2565x + 1,0748$	[mg/L]	1-12	0,9973
P-80	$y = -0,0092x^2 + 0,0928x + 1,3545$	[mg/L]	1-12	0,9958
P-120	$y = -0,0092x^2 + 0,1135x + 1,3352$	[mg/L]	1-12	0,6879

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 20 – Polinômio: sólidos suspensos.

Profundidade	Polinômio	Y (Parâmetro)	x (Mês)	R ²
P-0	$y = -0,1619x^2 + 2,1549x + 0,6094$	[mg/L]	1-12	0,9921
P-10	$y = -0,1014x^2 + 1,3404x + 2,8743$	[mg/L]	1-12	0,8824
P-40	$y = -0,0056x^2 - 0,0638x + 5,7418$	[mg/L]	1-12	0,3306
P-80	$y = -0,0183x^2 + 0,2057x + 5,139$	[mg/L]	1-12	0,0724
P-120	$y = -0,0275x^2 + 0,3465x + 4,2165$	[mg/L]	1-12	0,1225

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 21 – Polinômio: pH.

Profundidade	Polinômio	Y (Parâmetro)	x (Mês)	R ²
P-0	$y = 0,0036x^2 - 0,0339x + 7,4299$	[-]	1-12	0,9333
P-10	$y = -0,0003x^2 + 0,0286x + 7,0764$	[-]	1-12	0,9001
P-40	$y = -0,005x^2 + 0,083x + 6,863$	[-]	1-12	0,9333
P-80	$y = -0,0133x^2 + 0,2113x + 6,2697$	[-]	1-12	0,9444
P-120	$y = -0,0297x^2 + 0,4294x + 5,5316$	[-]	1-12	0,9756

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 22 – Polinômio: fosfato.

Profundidade	Polinômio	Y (Parâmetro)	x (Mês)	R ²
P-0	$y = 0,0002x^2 - 0,0028x + 0,0291$	[mg/L]	1-12	1,0000

P-10	$y = 0,0003x^2 - 0,0034x + 0,0282$	[mg/L]	1-12	0,9076
P-40	$y = -4E-05x^2 + 2E-05x + 0,0214$	[mg/L]	1-12	0,9684
P-80	$y = -4E-05x^2 + 0,0002x + 0,0189$	[mg/L]	1-12	0,6062
P-120	$y = -0,0004x^2 + 0,0053x + 0,0082$	[mg/L]	1-12	0,9979

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 23 – Polinômio: nitrato.

Profundidade	Polinômio	Y (Parâmetro)	x (Mês)	R ²
P-0	$y = -0,0013x^2 + 0,019x + 0,1613$	[mg/L]	1-12	0,9990
P-10	$y = -0,0025x^2 + 0,0368x + 0,1123$	[mg/L]	1-12	0,9931
P-40	$y = -0,0017x^2 + 0,0237x + 0,1689$	[mg/L]	1-12	0,8928
P-80	$y = -0,0011x^2 + 0,0154x + 0,1939$	[mg/L]	1-12	0,5455
P-120	$y = 0,0003x^2 - 0,0019x + 0,25$	[mg/L]	1-12	0,6803

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 24 – Polinômio: turbidez.

Profundidade	Polinômio	Y (Parâmetro)	x (Mês)	R ²
-	$y = -0,0049x^2 + 0,0474x + 1,3085$	[JTU]	1-12	0,9252

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.2.2 Modelagem: reservatório de Tucuruí

Estrutura-se o reservatório da planta hidrelétrica de Tucuruí com base no modelo apresentado, aliado aos parâmetros de operação indicados na Tabela 25.

Tabela 25 – Parâmetros de operação: Tucuruí.

Parâmetros de Operação	Valor	Unidade
Quantidade de Máquinas	23	[-]

Potência Instalada		8.400	[MW]
Elevações a Jusante	Normal	8,99	[m-acima do nível do mar]
	Máximo	25,05	[m-acima do nível do mar]
	Mínimo	5,00	[m-acima do nível do mar]
Volume do Reservatório	Normal	50 x 10 ⁹	[m ³]
	Útil	15 x 10 ⁹	[m ³]
Área Alagada	Normal	3.007	[km ²]
	Máxima de Cheia	-	[km ²]
	Mínimo Excepcional	-	[km ²]
Elevações a Montante	Normal	72,00	[m-acima do nível do mar]
	Máximo de Cheias	75,30	[m-acima do nível do mar]
	Mínimo Excepcional	62,00	[m-acima do nível do mar]

Fonte: Elaborada pelo autor com base em TUCURUÍ (2013).

Ajustam-se as dimensões do modelo com base nas informações dos volumes operacionais e das respectivas áreas alagadas. A Tabela 26 apresenta os valores de dimensionamento do modelo do reservatório.

Tabela 26 – Dimensões do modelo do reservatório de Tucuruí.

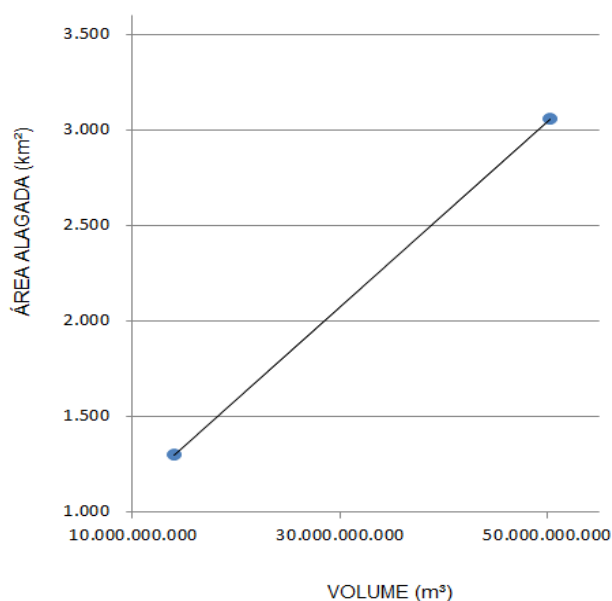
Parâmetros de Operação	Operacional 1	Operacional 2	Operacional 3	Unidade
B	8.500	7.000	5.500	[m]
b	50	50	50	[m]
h	49,00	40,30	31,60	[m]
S	200.475	142.064	87.700	[m ²]
L	240.000	197.396	154.793	[m]
Volume	50.274.000.000	28.042.881.342	13.575.314.380	[m ³]

Fonte: Elaborada pelo autor.

Estabelecem-se as condições operacionais 1, 2 e 3 com finalidade de limitar o regime de operação e os volumes máximos e mínimos do reservatório.

Com relação à área alagada, o modelo relaciona o volume a uma curva “área alagada *versus* volume” que, junto com as emissões de CO₂ e CH₄ informadas pelo MCT (BRASIL, 2006a), determinam as emissões equivalentes de poluentes em tC e tCO₂. A Figura 54 mostra a curva da área alagada em função do volume do reservatório.

Figura 54 – Área alagada x Volume: Tucuruí.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com relação à perda de carga no circuito de adução, considera-se um percentual de 3% da queda bruta (SIQUEIRA, 2006) e determina-se o fator K_p em função da vazão da turbina, conforme Equação (17).

$$h_p = K_p \times Q_{Turb}^2 \quad (17)$$

onde:

h_p : perda de carga em função da vazão turbinada [mca]

Q_{Turb} : vazão turbinada [m³/s]

K_p: constante de perda de carga do circuito hidráulico = 0,00056 [s²/m⁵]

Determina-se a queda bruta por meio da diferença entre a elevação de montante com a de jusante, as quais se obtêm, respectivamente, na superfície do espelho d'água no reservatório e no canal de fuga a jusante da casa de força. O regime operacional do reservatório influencia as elevações de montante e as de jusante. Estas últimas são determinadas por uma curva denominada “curva de jusante”, a qual está em função da vazão turbinada. Na Tabela 27, indicam-se as elevações de jusante e as vazões turbinadas.

Tabela 27 – Elevações de jusante e vazões turbinadas: Tucuruí.

Condição	Nível de Jusante (m-acima do nível do mar)	Vazão Turbinada (m³/s)
Mínima (3 unidades)	3.96	1.891
Normal (12 unidades)	6,80	7.565

Fonte: Elaborada pelo autor.

Inclui-se o perfil vertical da qualidade da água considerando a profundidade do corpo d'água no momento da operação do reservatório. O parâmetro de qualidade da água da superfície até o fundo é alterado e deve ser analisado dentro de um regime operacional da hidrelétrica, o qual altera a altura da coluna d'água e, em consequência, expõe a superfície do reservatório (ar-água) a um novo estado da qualidade da água.

O Trabalho de Louzada (2005) apresenta uma série de monitoramentos dos parâmetros de água no reservatório de Tucuruí, destacando-se os dados das estações M3 e M5, estando estas, respectivamente, imediatamente a montante e próxima à barragem. Os dados foram obtidos em períodos classificados como chuvosos (fevereiro e março) e de estiagem (agosto e junho), relacionados aos anos de 2001 e 2004.

A partir dos dados apresentados por Louzada (2005), elaboram-se curvas das quais são obtidos os polinômios que as representam para cada faixa de profundidade e para cada uma das grandezas monitoradas. Esses polinômios são usados para estimar os valores mensais de cada grandeza, tendo os meses do ano como variáveis de entrada, os quais são representados pelos números de 1 a 12 (Janeiro a Dezembro). Os polinômios referentes aos parâmetros de qualidade da água são apresentados através das Tabelas 28 a 35, os quais fazem parte da interação no modelo.

Tabela 28 – Polinômio: temperatura da água.

Profundidade	Polinômio	y (Parâmetro)	x (Mês)	R ²
P-0	$y = -0,2063x^2 + 2,1875x + 25,7$	[° C]	1-12	1,0000
P-10	$y = -0,1954x^2 + 2,0083x + 25,915$	[° C]	1-12	1,0000
P-20	$y = -0,14x^2 + 1,45x + 26,91$	[° C]	1-12	1,0000
P-40	$y = -0,175x^2 + 1,875x + 25,65$	[° C]	1-12	1,0000
P-60	$y = -0,1319x^2 + 1,4713x + 26,02$	[° C]	1-12	1,0000

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 29 – Polinômio: temperatura do ar.

Profundidade	Polinômio	Y (Parâmetro)	x (Mês)	R ²
-	$y = 0,3569x^2 - 4,6686x + 36,912$	[°C]	1-12	1,000

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 30 – Polinômio: oxigênio dissolvido.

Profundidade	Polinômio	y (Parâmetro)	x (Mês)	R ²
P-0	$y = 0,0133x^2 - 0,2342x + 6,625$	[mg/L]	1-12	1,0000
P-10	$y = 0,044x^2 - 0,5179x + 6,875$	[mg/L]	1-12	1,0000
P-20	$y = 0,0219x^2 - 0,2387x + 5,995$	[mg/L]	1-12	1,0000
P-40	$y = 0,0312x^2 - 0,4275x + 6,2$	[mg/L]	1-12	1,0000
P-60	$y = 0,0262x^2 - 0,3425x + 5,46$	[mg/L]	1-12	1,0000

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 31 – Polinômio: oxigênio saturado.

Profundidade	Polinômio	y (Parâmetro)	x (Mês)	R ²
P-0	$y = -0,0838x^2 - 0,3601x + 81,435$	[%]	1-12	0,9949
P-10	$y = 0,28x^2 - 3,7314x + 83,895$	[%]	1-12	0,9675

P-20	$y = 0,1076x^2 - 1,3331x + 74,997$	[%]	1-12	0,9511
P-40	$y = 0,188x^2 - 3,201x + 75,562$	[%]	1-12	0,9899
P-60	$y = 0,1919x^2 - 2,8004x + 67,111$	[%]	1-12	0,9875

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 32 – Polinômio: sólidos suspensos.

Profundidade	Polinômio	Y (Parâmetro)	x (Mês)	R ²
P-0	$y = 0,2657x^2 - 2,69x + 7,342$	[mg/L]	1-12	1,0000
P-10	$y = 0,1406x^2 - 1,2892x + 4,366$	[mg/L]	1-12	1,0000
P-20	$y = 0,0893x^2 - 0,8717x + 3,936$	[mg/L]	1-12	1,0000
P-40	$y = 0,1162x^2 - 1,2783x + 5,642$	[mg/L]	1-12	1,0000
P-60	$y = 0,0052x^2 - 0,2729x + 4,4$	[mg/L]	1-12	1,0000

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 33 – Polinômio: pH.

Profundidade	Polinômio	y (Parâmetro)	x (Mês)	R ²
P-0	$y = -0,0008x^2 + 0,0217x + 7,24$	[-]	1-12	1,0000
P-10	$y = -0,0031x^2 + 0,0463x + 7,155$	[-]	1-12	1,0000
P-20	$y = -0,0113x^2 + 0,1175x + 7,04$	[-]	1-12	1,0000
P-40	$y = -0,029x^2 + 0,2879x + 6,595$	[-]	1-12	1,0000
P-60	$y = -0,0462x^2 + 0,4175x + 6,44$	[-]	1-12	1,0000

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 34 – Polinômio: fosfato.

Profundidade	Polinômio	y (Parâmetro)	x (Mês)	R ²
P-0	$y = -6E-05x^2 - 0,0015x + 0,0214$	[mg/L]	1-12	1,0000
P-10	$y = -6E-05x^2 - 0,0017x + 0,0222$	[mg/L]	1-12	1,0000

P-20	$y = 0,0002x^2 - 0,0049x + 0,0319$	[mg/L]	1-12	1,0000
P-40	$y = -1E-04x^2 - 0,0016x + 0,0248$	[mg/L]	1-12	1,0000
P-60	$y = 0,0012x^2 - 0,0157x + 0,0531$	[mg/L]	1-12	1,0000

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 35 – Polinômio: nitrato.

Profundidade	Polinômio	y (Parâmetro)	x (Mês)	R ²
P-0	$y = 0,0038x^2 - 0,0385x + 0,1012$	[mg/L]	1-12	1,0000
P-10	$y = 0,0043x^2 - 0,0434x + 0,1146$	[mg/L]	1-12	1,0000
P-20	$y = 0,0047x^2 - 0,047x + 0,1241$	[mg/L]	1-12	1,0000
P-40	$y = 0,0054x^2 - 0,0525x + 0,1335$	[mg/L]	1-12	1,0000
P-60	$y = 0,0058x^2 - 0,0567x + 0,1415$	[mg/L]	1-12	1,0000

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.2.3 Resultados das Simulações

Apresentam-se os resultados obtidos pelas simulações dos casos estudados (Itaipu e Tucuruí) nas Tabelas 36, 37 e 38. Foram considerados três cenários na avaliação das emissões médias, sendo esses:

- Cenário 1: considera as mesmas condições de operação da época em que os reservatórios foram estudados pelo MCT: 1998-1999 para Itaipu e 1992-1993 para Tucuruí;
- Cenário 2: mesmo que o Cenário 1, mas considerando número de máquinas e área alagada diferentes;
- Cenário 3: o modelo é ajustado para toda série de vazões ao longo do tempo e a maximização da geração de eletricidade.

Ressalta-se que o inventário do MCT (BRASIL, 2006a) considerou um GWP para o metano 7,6 vezes maior que o dióxido de carbono. Esse índice foi atualizado recentemente

através da disponibilização do 5º Relatório sobre as mudanças do clima (AR5), passando-se a considerar que o metano emite 28 vezes mais que o dióxido de carbono (IPCC, 2014).

Tabela 36 – Comparação das emissões (tC/Ano) – MCT *versus* Modelo: Cenários 1 e 2.

Hidrelétrica	Emissão MCT (tC/Ano)	Período	Emissão Modelo Cenário 1		Emissão Modelo Cenário 2	
			GWP-7,6	GWP-28	GWP-7,6	GWP-28
Itaipu	93.269	1998-1999	89.262	261.219	80.285	234.948
Tucuruí	2.602.945	1992-1993	2.346.109	3.684.112	1.828.800	2.871.778

Fonte: Elaborada pelo autor.

Elabora-se a Tabela 37 com as diferenças percentuais com relação às emissões do MCT (BRASIL, 2006a).

Tabela 37 – Diferenças percentuais com relação às emissões do MCT *versus* Modelo: Cenários 1 e 2.

Hidrelétrica	Emissão MCT (tC/Ano)	Período	Emissão Modelo Cenário 1		Emissão Modelo Cenário 2	
			GWP-7,6	GWP-28	GWP-7,6	GWP-28
Itaipu	93.269	1998-1999	- 4,3%	180,1%	- 13,9%	151,9%
Tucuruí	2.602.945	1992-1993	- 9,9%	41,5%	- 29,7%	10,3%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com os resultados obtidos, verifica-se que o índice GWP impacta diretamente nos cálculos das emissões equivalentes, devendo esse item ser constantemente atualizado. Quando analisado no Cenário 1, percebe-se que, uma vez ajustado o modelo para as condições da época, referentes ao número de máquinas, área alagada, cotas e volumes, os resultados obtidos diferem do MCT (BRASIL, 2006a) em -4,3% para Itaipu e em -9,9% para Tucuruí. Ao atualizar o GWP para 28, as emissões aumentam em Itaipu e Tucuruí, em 180,1% e em 41,5%, respectivamente. As diferenças se devem ao fato do maior indicador de GWP e pela relação de quantidade de carbono no metano e no dióxido de carbono, mencionados anteriormente na Equação (1). Além disso, a quantidade proporcional de metano por cada CO₂ (CH₄/CO₂) emitido é maior em Itaipu do que em Tucuruí.

Com relação ao Cenário 2, os resultados obtidos partem da análise do modelo sob as variações impostas pela série histórica de vazões. As condições operacionais do Cenário 2 não são as mesmas do Cenário 1.

No Cenário 1, a área alagada de Itaipu mencionada pelo MCT (BRASIL, 2006a) é de 1549 km² e as elevações operacionais oscilam entre 220 e 219 m-acima do nível do mar (dezembro-99 ocorreu o abaixamento da cota do reservatório para 215 m-acima do nível do mar) (THÁ, 2007); no Cenário 2, Itaipu possui uma área alagada de 1350 km² para um volume de 29.000 hm³ e elevação da cota do reservatório de 220 m-acima do nível do mar, conforme informações de Furnas (2013a). Diante dessa diferença de cenários, obteve-se uma redução nas emissões de 13,9%.

Para Tucuruí, no Cenário 1, a quantidade de máquinas à época considerava a metade da potência instalada atualmente e a cota do reservatório estava na elevação 72 m-acima do nível do mar para um volume de 45.500 hm³ e uma área alagada de 2.430 km²; no Cenário 2, estabelece-se para Tucuruí uma condição maior de motorização e alcança-se uma cota de elevação de 75 m-acima do nível do mar para um volume de 50.000 hm³ e área alagada de 3.050 km². Dessa forma, Tucuruí alcançou uma redução no período de 29,7%. Considerada a atualização do GWP no Cenário 2, Itaipu e Tucuruí obtiveram aumentos de 151,9% e 10%, respectivamente, nas emissões relativas ao MCT (BRASIL, 2006a).

Em um terceiro Cenário, considera-se toda a série de vazões ao longo do tempo e a maximização da energia. A Tabela 38 mostra o quanto se emite de tonelada de massa de carbono nessa condição. Para um GWP de 7,6, as hidrelétricas emitiriam menos ao se comparar com as emissões do relatório do MCT. Com a atualização do GWP, ocorre o inverso: as hidrelétricas passam a emitir mais GEE.

Tabela 38 – Comparação das emissões (tC/Ano) – MCT *versus* Modelo: Cenário 3.

Hidrelétrica	Emissão MCT	Energia Média ao longo da Série Histórica (GWh)	Emissão Modelo ao longo da Série Histórica	
	(tC/Ano)		GWP-7,6	GWP-28
Itaipu	93.269	91.930	80.284	234.948
Tucuruí	2.602.945	43.777	1.957.228	3.073.450

Fonte: Elaborada pelo autor.

Sob o ponto de vista da emissão de GEE pela geração, observa-se que Itaipu emite 1,01 gC/kWh no cenário do MCT, 0,87 gC/kWh com GWP 7,6 e 2,56 gC/kWh no GWP 28. Na mesma sequência, Tucuruí emite 59,46 gC/kWh, 44,71 gC/kWh e 70,21 gC/kWh.

6.3 EMISSÕES EQUIVALENTES DE GEE

De acordo com os resultados obtidos na simulação das plantas hidrelétricas (Itaipu e Tucuruí), utiliza-se o método matemático da “Eliminação de Gauss” para obter duas equações: uma que resulta em toneladas de carbono (tC) e outra em toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO_{2eq}).

As Tabelas 39 e 40 apresentam os valores médios das emissões equivalentes de tC e de tCO_{2eq}, referentes aos períodos estabelecidos, incluindo aqueles considerados nos trabalhos de medições das hidrelétricas em questão.

Tabela 39 – Valores médios obtidos da simulação: tC – GWP 7,6.

Hidrelétrica	Ano	IQA - O.D. Saturado (%)	Carga do Reservatório (10 ⁶ .m ³)	Emissão tC-GWP-7,6 (Mês)
Itaipu	1998	86,85	947,00	7.550,29
Itaipu	1999	86,80	644,91	7.326,67
Itaipu	2000	84,95	716,76	7.397,73
Tucuruí	1992	101,36	2.900,84	198.924,91
Tucuruí	1993	100,49	2.177,92	192.093,18
Tucuruí	1994	99,09	2.796,41	170.956,77

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 40 – Valores médios obtidos da simulação: tCO_{2eq} – GWP 28.

Hidrelétrica	Ano	IQA - O.D. Saturado (%)	Carga do Reservatório (10 ⁶ .m ³)	Emissão tCO _{2eq} -GWP-28 (Mês)
Itaipu	1998	86,85	951,49	30.512,48
Itaipu	1999	86,80	643,92	30.512,48
Itaipu	2000	84,95	702,39	30.512,48
Tucuruí	1992	98,81	2.775,27	647.880,05
Tucuruí	1993	97,94	2.016,90	550.386,17
Tucuruí	1994	99,08	2.792,40	661.707,91

Fonte: Elaborada pelo autor.

O método matemático utilizado aplica um sistema triangular em que a primeira etapa do processo consiste em zerar os elementos da primeira coluna abaixo da diagonal principal. A etapa seguinte consiste na repetição da primeira etapa. Elaborou-se uma planilha eletrônica com a finalidade de auxiliar nas determinações das equações de emissões equivalentes de GEE com base no método matemático.

A Figura 55 apresenta os resultados com base nas informações disponibilizadas na Tabela 39.

Figura 55 – Determinação da equação de tC com GWP-7,6: resultados das interações.

	24.002.711,63	-587.452,99	3.583,55	-44,45	0,1735	3.596,98	
		I ODsat (%)	q (m³)	I ODsat x q	q ²	I ODsat ²	tC-GWP-7,6
1	1,00	86,85	947,00	82.243,66	896.809,00	7.542,32	7550,29
2	1,00	86,80	844,91	55.978,19	415.908,91	7.534,24	7326,67
3	1,00	84,95	716,76	60.888,76	513.744,90	7.218,50	7397,73
4	1,00	101,36	2.900,84	294.029,14	8.414.872,71	10.273,85	198924,91
5	1,00	100,49	2.177,92	218.859,18	4.743.335,53	10.098,24	192093,18
6	1,00	99,09	2.796,41	277.092,09	7.819.908,89	9.818,53	170956,77

1,00	86,85	947,00	82.243,66	896.809,00	7.542,32	7.550,29
0,00	-0,05	-302,09	-26.265,47	-480.900,09	-8,08	-223,62
0,00	-1,90	-230,24	-21.354,90	-383.064,10	-325,82	-152,56
0,00	14,51	1.953,84	211.785,48	7.518.063,71	2.731,53	191.374,62
0,00	13,64	1.230,92	136.615,52	3.846.526,53	2.555,92	184.542,89
0,00	12,24	1.849,41	194.848,43	6.923.099,89	2.276,21	163.406,48

-0,05	-302,09	-26.265,47	-480.900,09	-8,08	-223,62
-1,90	-230,24	-21.354,90	-383.064,10	-325,82	-152,56
14,51	1.953,84	211.785,48	7.518.063,71	2.731,53	191.374,62
13,64	1.230,92	136.615,52	3.846.526,53	2.555,92	184.542,89
12,24	1.849,41	194.848,43	6.923.099,89	2.276,21	163.406,48

-0,05	-302,09	-26.265,47	-480.900,09	-8,08	-223,62
0,00	12.083,23	1.049.250,59	19.218.877,18	3,51	8.962,40
0,00	-92.276,90	-7.981.187,26	-142.488.798,26	211,32	121.620,97
0,00	-87.351,23	-7.565.235,16	-137.168.278,22	186,78	118.970,58
0,00	-77.633,34	-6.715.847,64	-119.606.288,58	150,44	104.569,93

12.083,23	1.049.250,59	19.218.877,18	3,51	8.962,40
-92.276,90	-7.981.187,26	-142.488.798,26	211,32	121.620,97
-87.351,23	-7.565.235,16	-137.168.278,22	186,78	118.970,58
-77.633,34	-6.715.847,64	-119.606.288,58	150,44	104.569,93

12.083,23	1.049.250,59	19.218.877,18	3,51	8.962,40
0,00	31.700,75	4.281.393,10	238,11	190.064,80
0,00	19.930,50	1.767.423,07	212,14	183.760,92
0,00	25.463,13	3.872.720,44	172,98	162.152,30

31.700,75	4.281.393,10	238,11	190.064,80
19.930,50	1.767.423,07	212,14	183.760,92
25.463,13	3.872.720,44	172,98	162.152,30

31.700,75	4.281.393,10	238,11	190.064,80
0,00	-924.320,89	62,44	64.265,75
0,00	433.758,91	-18,28	9.485,75

-924.320,89	62,44	64.265,75
433.758,91	-18,28	9.485,75

-924.320,89	62,44	64.265,75
0,00	11,02	39.643,94

Fonte: Elaborada pelo autor.

Determina-se a Equação (18) para calcular as emissões de tC com GWP de 7,6, com a finalidade de auxiliar na análise de outras duas importantes hidrelétricas: Serra da Mesa e Três Marias.

$$tC_{GWP7,6} = 24.002.711,63 - 587.452,99 \times I_{ODsat(\%)} + 3.583,55 \times qr - 44,45 \times I_{ODsat(\%)} \times qr + 0,1735 \times qr^2 + 3.596,98 \times I_{ODsat(\%)}^2 \quad (18)$$

onde:

$tC_{GWP-7,6}$: tonelada de massa de carbono com GWP 7,6 [tC/mês]

qr : carga do reservatório [m^3]

$I_{OD(\%)}$: índice de qualidade da água para oxigênio dissolvido saturado [-]

A Figura 56 apresenta os resultados com base nas informações disponibilizadas na Tabela 40.

Figura 56 — Determinação da equação de tCO_2eq com GWP-28: resultados das interações.

	107.722.501,58	-2.628.491,07	15.275,64	-188,73	0,6952	16.044,73	
		$I_{ODsat}(\%)$	$q(m^3)$	$I_{ODsat} \times q$	q^2	I_{ODsat}^2	$tCO_2-GWP-28$
1	1,00	86,85	951,49	82.633,60	905.333,22	7.542,32	30512,48
2	1,00	86,80	643,92	55.892,26	414.632,97	7.534,24	30512,48
3	1,00	84,95	702,39	59.668,03	493.351,71	7.216,50	30512,48
4	1,00	98,81	2.775,27	274.224,43	7.702.123,57	9.763,42	647890,05
5	1,00	97,94	2.016,90	197.535,19	4.067.885,61	9.592,24	550386,17
6	1,00	99,08	2.792,40	276.670,99	7.797.497,76	9.816,85	661707,91

1,00	86,85	951,49	82.633,60	905.333,22	7.542,32	30.512,48
0,00	-0,05	-307,57	-26.741,35	-490.700,25	-8,08	0,00
0,00	-1,90	-249,10	-22.965,57	-411.981,51	-325,82	0,00
0,00	11,96	1.823,78	191.590,83	6.796.790,35	2.221,10	617.367,57
0,00	11,09	1.065,41	114.901,58	3.162.552,39	2.049,92	519.873,69
0,00	12,23	1.840,91	194.037,39	6.892.164,54	2.274,53	631.195,43

-0,05	-307,57	-26.741,35	-490.700,25	-8,08	0,00
-1,90	-249,10	-22.965,57	-411.981,51	-325,82	0,00
11,96	1.823,78	191.590,83	6.796.790,35	2.221,10	617.367,57
11,09	1.065,41	114.901,58	3.162.552,39	2.049,92	519.873,69
12,23	1.840,91	194.037,39	6.892.164,54	2.274,53	631.195,43

-0,05	-307,57	-26.741,35	-490.700,25	-8,08	0,00
0,00	12.287,74	1.067.036,95	19.589.423,62	3,51	0,00
0,00	-77.259,77	-6.884.244,44	-119.373.896,15	143,68	617.367,57
0,00	-72.267,08	-6.260.913,56	-113.832.829,66	123,58	519.873,69
0,00	-79.027,45	-6.836.976,53	-122.126.030,24	150,23	631.195,43

24.801,12	3.795.536,15	165,74	617.367,57
14.578,95	1.377.127,19	144,22	519.873,69
25.570,19	3.861.485,69	172,79	631.195,43
24.801,12	3.795.536,15	165,74	617.367,57
0,00	-854.018,58	46,79	156.963,95
0,00	-51.748,31	1,91	-5.316,43

-854.018,58	46,79	156.963,95
-51.748,31	1,91	-5.316,43
-854.018,58	46,79	156.963,95
0,00	-0,92	-14.827,49

Fonte: Elaborada pelo autor.

Determina-se a Equação (19) para calcular as emissões de tCO_{2eq} com GWP de 28, tendo por finalidade auxiliar na análise da eficiência ecológica das usinas hidrelétricas.

$$tCO_{2eqGWP28} = 107.722.501,58 - 2.628.491,07 \times I_{ODsat(\%)} + 15.275,64 \times qr - 188,73 \times I_{ODsat(\%)} \times qr + 0,6952 \times qr^2 + 16.044,73 \times I_{ODsat(\%)}^2 \quad (19)$$

onde:

$tCO_{2eqGWP-28}$: tonelada de massa de dióxido de carbono equivalente com GWP-28 [tCO_{2eq} /mês]

qr: carga do reservatório [m^3]

$I_{OD(\%)}$: índice de qualidade da água para oxigênio dissolvido saturado [-]

De modo a certificar os equacionamentos propostos, consideram-se duas hidrelétricas dentro das avaliadas pelo MCT: Serra da Mesa e Três Marias. As Tabelas 41 e 42 mostram, respectivamente, os principais parâmetros de operação das usinas.

Tabela 41 – Parâmetros de operação: Serra da Mesa.

Parâmetros de Operação		Valor	Unidade
Quantidade de Máquinas		3	[-]
Potencia Instalada		1.275	[MW]
Elevações a Jusante	Normal	333,00 (estimado considerando perda hidráulica de 10%)	[m-acima do nível do mar]
	Máximo	-	[m-acima do nível do mar]
	Mínimo	-	[m-acima do nível do mar]
Volume do Reservatório	Normal	$54,4 \times 10^9$	[m^3]
	Útil	$43,25 \times 10^9$	[m^3]
Área Alagada	Normal	1.784	[km^2]
	Máxima de Cheia	-	[km^2]

	Mínimo Excepcional	-	[km ²]
Elevações a Montante	Normal	460,00	[m-acima do nível do mar]
	Máximo de Cheias	461,50	[m-acima do nível do mar]
	Mínimo Excepcional	417,30	[m-acima do nível do mar]

Fonte: Elaborada pelo autor com base em FURNAS (2013b).

Tabela 42 – Parâmetros de operação: Três Marias.

Parâmetros de Operação		Valor	Unidade
Quantidade de Máquinas		63	[-]
Potência Instalada		396	[MW]
Elevações a Jusante	Normal	521,25 (estimado, considerando perda hidráulica de 10%)	[m-acima do nível do mar]
	Máximo	-	[m-acima do nível do mar]
	Mínimo	-	[m-acima do nível do mar]
Volume do Reservatório	Normal	19,5 x 10 ⁹	[m ³]
	Útil	15,3 x 10 ⁹	[m ³]
Área Alagada	Normal	1.090	[km ²]
	Máxima de Cheia	-	[km ²]
	Mínimo Excepcional	-	[km ²]
Elevações a montante	Normal	-	[m-acima do nível do mar]
	Máximo de Cheias	572,50	[m-acima do nível do mar]
	Mínimo Excepcional	549,20	[m-acima do nível do mar]

Fonte: Elaborada pelo autor com base em MINAS GERAIS (2012)

Os valores físico-químicos de qualidade da água das hidrelétricas são obtidos de acordo com Peixoto et al. (2002) e Gomes (2009). Os autores apresentam médias de oxigênio dissolvido de 6,42 mg/L e 6,33mg/L para as hidrelétricas de Serra da Mesa e de Três Marias, respectivamente, resultando em valores para o oxigênio dissolvido saturado de 81,6% e de 79,%. Os valores médios de temperatura informados são de 25,89°C para Serra da Mesa e 24,75°C para Três Marias. A Tabela 43 resume os valores obtidos na simulação.

Tabela 43 – Comparação das emissões - Equação: tC.

Hidrelétrica	q (m³)	IQA - O.D. Saturado (%)	Emissão MCT (tC/Ano)	Emissão tC GWP 7,6 (tC/Ano)
Serra da Mesa	54.397	86	895.373	957.889
Três Marias	19.527	84,5	540.335	512.070

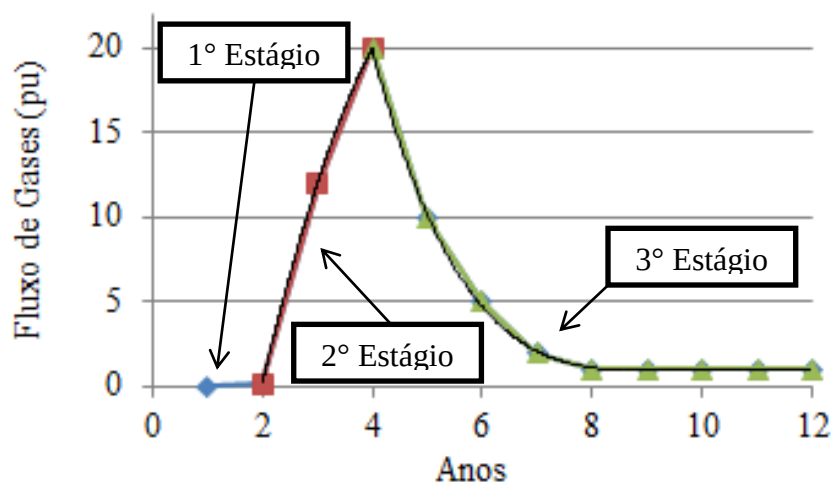
Fonte: Elaborada pelo autor.

6.4 EMISSÕES DE GEE INCORPORANDO O ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO

As simulações obtidas até o momento não consideram as emissões iniciais na fase de enchimento do reservatório em seus primeiros anos, pois as medições realizadas pelo MCT foram obtidas após essa fase inicial.

Para considerar esse impacto, utiliza-se a curva de fluxo de gases apresentada por Santos et al. (2008). Considera-se que nos primeiros anos do reservatório (3-5 anos), as emissões atingem altos valores, os quais decrescem ao longo dos demais anos, até atingir o regime permanente. Nessa etapa inicial, a decomposição é dominante pela biomassa na área do reservatório e, nos demais anos, prevalece a biomassa formada no próprio reservatório. A Figura 57 apresenta a curva mencionada, sendo possível observar-se que, a partir do oitavo mês, o reservatório inicia o regime permanente de emissões.

Figura 57 – Fluxo de gases nos primeiros anos do reservatório.



Fonte: Elaborada pelo autor com base em SANTOS et al. (2006).

A Tabela 44 apresenta os polinômios referentes aos três estágios indicados anteriormente. Os resultados dos polinômios estão em pu (por unidade), pois a finalidade é obter o quanto se emite por estágio com relação ao regime permanente. Pu é a forma de expressar matematicamente a razão entre duas grandezas ou quantidades, avaliadas na mesma unidade física ou matemática.

Tabela 44 – Estágios de emissões iniciais de fluxos de gases: polinômios.

Estágio	Descrição	Polinômio	Y (Emissão)	x (Ano)	R ²
1º	Emissões zero ou mínima	$y = 0$	[pu]	0-2	-
2º	Emissões mínima para máxima	$y_{2-4} = -1,9x^2 + 21,3x - 34,8$	[pu]	2-4	1,0000
3º	Emissões máxima para permanente	$y_{4-10} = 0,0122x^4 - 0,5111x^3 + 7,9578x^2 - 54,706x + 141,03$	[pu]	4-10	0,9996

Fonte: Elaborada pelo autor.

Propõe-se a inclusão das emissões iniciais de GEE no regime permanente, considerando-se a distribuição das mesmas no período de concessão da usina hidrelétrica, de forma que o empreendedor considere o impacto das emissões iniciais no enchimento do reservatório, o qual será ocasionado pela nova instalação durante o tempo concessivo.

Calculam-se as emissões de tCO_{2eq} por ano conforme Equação (20).

$$tCO_{2eq_{ANO}} = tCO_{2eq} \times 12 \quad (20)$$

onde:

$tCO_{2eq_{ANO}}$: tonelada de massa de dióxido de carbono equivalente por ano [tCO_{2eq}/ano]

tCO_{2eq} : tonelada de massa de dióxido de carbono equivalente por mês [$tCO_{2eq}/mês$]

Para os primeiros dez anos de emissões, considera-se a Equação (21).

$$tCO_{2eq_{10}} = tCO_{2eq_{ANO}} \times \sum_{N=0}^{10} y_N \quad (21)$$

onde:

tCO_2eq_{ANO} : tonelada de massa de dióxido de carbono equivalente por ano [tCO_2eq/ano]

tCO_2eq_{10} : tonelada de massa de dióxido de carbono equivalente nos primeiros dez anos [tCO_2eq/ano]

y_N : equação polinomial referente à Tabela 44 [pu]

Obtém-se a média mensal em dez anos, utilizando-se a Equação (22).

$$tCO_2eq_{10-MÊS} = \frac{tCO_2eq_{10}}{120} \quad (22)$$

onde:

$tCO_2eq_{10-MÊS}$: tonelada de massa de dióxido de carbono equivalente mensal em dez anos [$tCO_2eq_{10}/mês$]

tCO_2eq_{10} : tonelada de massa de dióxido de carbono equivalente nos primeiros dez anos [tCO_2eq/ano]

A Equação (23) considera a distribuição das emissões mensais dos primeiros dez anos do enchimento do reservatório no período de concessão da usina hidrelétrica, as quais se somam às de regime permanente.

$$tCO_2eq_o = tCO_2eq + \frac{tCO_2eq_{10-MÊS}}{A_{op}} \quad (23)$$

onde:

tCO_2eq_o : tonelada de massa de dióxido de carbono equivalente incorporando o enchimento do reservatório [$tCO_2eq/mês$]

tCO_2eq : tonelada de massa de dióxido de carbono equivalente por mês [$tCO_2eq/mês$]

$tCO_2eq_{10-MÊS}$: tonelada de massa de dióxido de carbono equivalente mensal em dez anos [$tCO_2eq_{10}/mês$]

A_{op} : tempo de concessão [meses]

6.5 EFICIÊNCIA ECOLÓGICA DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Cardu e Baica (1999) introduziram o conceito de dióxido de carbono equivalente $[(CO_2)e]$ baseando-se na concentração máxima permitida para o CO_2 na atmosfera, que é de 10.000 mg/m³. Para quantificar o impacto ambiental, os autores propuseram um indicador definido como a razão entre o dióxido de carbono equivalente do combustível e seu poder calorífico inferior (PCI). A esse indicador deu-se o nome de “indicador de poluição”, conforme Equação (24).

$$\Pi_g = \frac{(CO_2)e}{PCI} \quad (24)$$

onde:

Π_g : indicador de poluição em termoeletricas [kg (CO₂)e/MJ]

(CO₂)e: dióxido de carbono equivalente [kg (CO₂)e /kgComb]

PCI : poder calorífico inferior do combustível [MJ/kgComb]

Ao relacionar o dióxido de carbono emitido pelo processo de combustão com seu poder calorífico, Cardu e Baica (1999) possibilitam comparações entre combustíveis heterogêneos. Contudo, é possível um combustível possuir alto poder calorífico e emitir grande quantidade de poluentes na atmosfera (ou ter a emissão de gases nocivos desprezíveis ou nulos) sem possuir a energia desejada para se obter uma boa eficiência no processo produtivo.

Partindo da hipótese de que o melhor combustível é aquele que possuir o menor indicador de poluição, Cardu e Baica (1999) propõem um indicador mais complexo e adimensional, que expresse o impacto ecológico dos gases nocivos emitidos na atmosfera, os quais são resultantes da queima do combustível em relação à energia útil produzida por usinas termoeletricas. Villela e Silveira (2007) utilizam a eficiência ecológica (ϵ) como um número que permite avaliar o impacto ambiental das emissões gasosas de um sistema mediante a comparação entre emissões de poluentes integrados hipoteticamente (emissões equivalentes de CO₂) com os padrões existentes de qualidade do ar. Por meio do indicador de poluição e da

eficiência da planta hidrelétrica (η_p), determina-se a eficiência ecológica, de acordo com a Equação (25).

$$\varepsilon = \left[\frac{0,204\eta_p}{\eta_p + \pi_{gHid}} \times \ln(135 - \pi_{gHid}) \right]^{0,5} \quad (25)$$

onde:

ε : eficiência ecológica [-]

η_p : eficiência da planta hidrelétrica [-]

π_{gHid} : indicador de poluição em hidrelétricas [$\text{kg } (CO_2)e / \text{MJ}$]

A eficiência ecológica avalia quão poluidor é um processo produtivo, considerando as emissões por combustível e a eletricidade utilizada. Obtém-se uma faixa de 0 até 1, na qual o valor igual a 0 indica o grau máximo de impacto ambiental, enquanto uma eficiência igual a 1 mostra que o sistema analisado encontra-se no nível de menor impacto ambiental.

No caso da usina hidrelétrica, o combustível é a massa de água que passa por cada turbina. Com a adaptação mencionada por Braga (2010), tem-se a Equação (26).

$$\pi_{gHid} = \frac{(CO_2)e}{E_{Hid}} \quad (26)$$

onde:

π_{gHid} : indicador de poluição em hidrelétricas [$\text{kg } (CO_2)e / \text{MJ}$]

$(CO_2)e$: dióxido de carbono equivalente [$\text{kg } (CO_2)e / \text{kg de Água}$]

E_{Hid} : energia específica da hidrelétrica [MJ/kg de Água]

As emissões de poluentes da usina hidrelétrica ocorrem através do reservatório em função da área inundada, sendo influenciadas pelo modo do regime de operação. Obtém-se o volume do reservatório em função da vazão natural do rio (série histórica de vazões) e do quanto a usina produz de eletricidade em determinado momento. Sendo assim, as emissões de

poluentes terão sua variação ao longo do tempo em função da mudança de volume do reservatório (área alagada), obtendo um valor médio de CO₂ equivalente no período.

6.5.1 Indicador de Poluição de Centrais Hidrelétricas

O indicador de poluição tem a finalidade de auxiliar no cálculo da eficiência ecológica e, conseqüentemente, determinar o impacto ambiental das emissões da central hidrelétrica. Considerando a Equação (20) do indicador de poluição, tem-se o parâmetro (CO₂)_e como sendo a razão de fluxos mássicos de CO₂ e de H₂O (BRAGA, 2010), conforme Equação (27).

$$(CO_2)_e = \frac{mCO_2}{mH_2O} \quad (27)$$

onde:

(CO₂)_e: dióxido de carbono equivalente [kg (CO₂)_e /kg de Água]

mCO₂: fluxo mássico de dióxido de carbono por segundo [kg/s]

mH₂O: fluxo mássico de água por segundo [kg/s]

Com relação às massas de CO₂ e de H₂O, verifica-se em Braga (2010), respectivamente, a Equação (28) e a Equação (29).

$$mCO_2 = tCO_{2eq} \times 0,000386 \quad (28)$$

onde:

mCO₂: fluxo mássico de dióxido de carbono por segundo [kg/s]

tCO_{2eq-o}: tonelada de massa de dióxido de carbono equivalente incorporando o enchimento do reservatório [tCO_{2eq}/mês]

$$mH_2O = \frac{Ep}{\eta_p \times g \times H} \quad (29)$$

onde:

mH_2O : fluxo mássico de água [kg/s]

E_p : eletricidade produzida [W]

η_p : eficiência da planta hidrelétrica [-]

H : queda [m]

g : aceleração da gravidade [m/s²]

Incluem-se as Equações (27) e (28) na Equação (29), obtendo-se, assim, a Equação (30).

$$\pi_{gHid} = \frac{\left(\frac{3,86 \times 10^{-4}}{mH_2O} \right) \times tCO_2eq_0}{E_{Hid}} \quad (30)$$

onde:

π_{gHid} : indicador de poluição em hidrelétricas [kg (CO₂)e /MJ]

mH_2O : fluxo mássico de água [kg/s]

tCO_2eq-o : tonelada de massa de dióxido de carbono equivalente incorporando o enchimento do reservatório [tCO₂eq/mês]

E_{Hid} : energia específica da hidrelétrica [MJ/kg de Água]

Determina-se a energia específica da hidrelétrica, utilizando-se a Equação (31), sendo esta em razão da eletricidade produzida pelos fluxos mássicos de água que passam pelas turbinas (BRAGA, 2010).

$$E_{Hid} = \frac{E_p}{10^3 \times mH_2O} \quad (31)$$

onde:

E_{Hid} : energia específica da hidrelétrica [MJ/kg de Água]

E_p : eletricidade produzida [kW]

mH_2O : fluxo mássico de água [kg/s]

CAPÍTULO 7 ANÁLISE ECONÔMICA INCORPORANDO A EFICIÊNCIA ECOLÓGICA

7.1 MÉTODO DE ANÁLISE ECONÔMICA UTILIZADO

Nessa etapa de análise econômica, avalia-se o custo de produção de energia elétrica, considerando, também, os custos de manutenção e operação (SIQUEIRA e SILVEIRA, 2004). Na Equação (32), calcula-se o custo da eletricidade produzida na usina hidrelétrica considerando o custo do investimento, os custos de manutenção e de operação, o fator de anuidade e a produção de energia elétrica.

$$C_{Ele} = \frac{I_{pl} \times f}{Hop \times Ep} + C_{ManTH} + C_{ManGer} + C_{Oper} \quad (32)$$

onde:

C_{Ele} : custo da eletricidade produzida [US\$/kWh]

I_{pl} : custo de implantação da usina [US\$]

f : fator de anuidade [-]

Hop : número de horas de operação [h/ano]

Ep : eletricidade produzida [kW]

C_{ManTH} : custo para manutenção da turbina [US\$/kWh]

C_{ManGer} : custo para manutenção do gerador [US\$/kWh]

C_{Oper} : custo de operação da usina [US\$/kWh]

Conforme Equação (33), o fator de anuidade representa o resultado do período de amortização do capital investido, considerando a taxa de juros anual percentual, apresentada na Equação (34).

$$f = \frac{q^k \times (q - 1)}{q^k - 1} \quad (33)$$

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (34)$$

onde:

f: fator de anuidade [-]

q: fator da taxa de juros “r” ao ano [%_{a. a.}]

k: período de amortização do capital investido [anos]

Determina-se a receita anual esperada utilizando-se a Equação (35).

$$R = Hop \times Ep \times (P_{Ele} - C_{Ele}) \quad (35)$$

onde:

R: receita anual [US\$]

Hop: número de horas de operação [h/ano]

Ep: eletricidade produzida [kW]

P_{ele}: preço da eletricidade no mercado [US\$/kWh]

C_{Ele}: custo da eletricidade produzida [US\$/kWh]

7.2 PROPOSTA DE ANÁLISE ECONÔMICA

Adequa-se a Equação (32) para incluir a eficiência ecológica como fator de penalidade pelas emissões de poluentes. Sendo assim, tem-se a Equação (36).

$$C_{Ele} = \frac{I_{pl} \times f}{Hop \times Ep \times \varepsilon} + C_{ManTH} + C_{ManGer} + C_{Oper} \quad (36)$$

onde:

C_{Ele}: custo da eletricidade produzida [US\$/kWh]

I_{pl}: custo de implantação da usina [US\$]

f: fator de anuidade [-]

Hop: número de horas de operação [h/ano]

Ep: eletricidade produzida [kW]

ε : eficiência ecológica [-]

$C_{\text{Man TH}}$: custo para manutenção da turbina [US\$/kWh]

$C_{\text{Man Ger}}$: custo para manutenção do gerador [US\$/kWh]

C_{Oper} : custo de operação da usina [US\$/kWh]

7.3 ESTUDO DE CASO DE UMA CENTRAL HIDRELÉTRICA HIPOTÉTICA

Com a finalidade de apresentar o método de avaliação econômica aplicando o impacto do efeito ecológico sob a ótica das emissões de poluentes em reservatórios de centrais hidrelétricas, propõe-se uma Central Hidrelétrica Hipotética com as características apresentadas na Tabela 45. Com base nas informações, realiza-se o estudo do quanto a planta hidrelétrica será penalizada no período de amortização do capital investido (*pay-back*).

Tabela 45 – Parâmetros de operação: CH hipotética.

Parâmetros de Operação		Valor	Unidade
Quantidade de Máquinas		5	[-]
Potencia Instalada		260	[MW]
Elevação a Jusante	Médio	124	[m-acima do nível do mar]
Volume do Reservatório	Normal	$2,7 \times 10^9$	[m ³]
Área Alagada	Normal	3,76	[km ²]
Elevação a Montante	Normal	214	[m-acima do nível do mar]
Qr	Médio	0,007325	[10 ⁶ .m ³]
$I_{\text{ODsat}}\%$	Médio	88	[-]
Vazão Média do Afluente	Médio	330	[m ³ /s]

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para avaliar o impacto das emissões sob o ponto de vista do índice de potencial de aquecimento global (GWP), deve-se utilizar a Equação (19) para a emissão de equivalente de

CO₂ com GWP de 28 vezes (tCO_{2eq-GWP 28}) e determinar uma nova equação para incluir o GWP de 7,6 vezes (tCO_{2eq-GWP 7,6}).

Com base na Tabela 46, incluem-se os resultados de tCO_{2eq} obtidos das simulações realizadas anteriormente para Itaipu e Tucuruí, com GWP de 7,6.

Tabela 46 – Valores médios obtidos da simulação: tCO₂ – GWP 7,6.

Hidrelétrica	Ano	IQA - O.D. Saturado (%)	Carga do Reservatório (10 ⁶ .m ³)	Emissão tCO _{2eq} – GWP 7,6 (Mês)
Itaipu	1998	86,85	947,00	15.040,00
Itaipu	1999	86,80	644,91	14.595,12
Itaipu	2000	84,95	716,76	14.736,67
Tucuruí	1992	101,36	2.900,84	630.772,84
Tucuruí	1993	100,49	2.177,92	609.110,06
Tucuruí	1994	99,09	2.796,41	542.088,41

Fonte: Elaborada pelo autor.

Baseando-se no mesmo procedimento utilizado no Capítulo 6 e nas informações da Tabela 46, determina-se a Equação (37) para tCO_{2eqGWP 7,6}.

$$tCO_{2eqGWP7,6} = 78.199.672,64 - 1.914.505,97 \times I_{ODsat(\%)} + 11.724,63 \times qr - 145,45 \times I_{ODsat(\%)} \times qr + 0,5681 \times qr^2 + 11.724,93 \times I_{ODsat(\%)}^2 \quad (37)$$

onde:

tCO_{2eqGWP 7,6}: tonelada de massa de dióxido de carbono equivalente com GWP 7,6 [tCO_{2eq}/mês]

qr: carga do reservatório [m³]

I_{OD}(%): índice de qualidade da água para oxigênio dissolvido saturado [-]

Para um projeto hipotético, situado na região Amazônica, considera-se o oxigênio dissolvido, tomando por base o Rio Negro. Verifica-se que o valor médio de oxigênio dissolvido é de 6,63 mg/L (PINTO et al., 2009). Com uma temperatura média da água de

25°C e com a elevação a montante do projeto hipotético, determina-se o valor de 81,3% para o oxigênio dissolvido saturado ($OD_{Sat}\%$).

Aplicando-se os valores obtidos da carga do reservatório e do índice de qualidade da água para $OD_{Sat}\%$, determinam-se as emissões médias de $tCO_{2eqGWP\ 28}$ em 278.028 tCO_{2eq} e $tCO_{2eqGWP\ 7,6}$ em 214.457 tCO_{2eq} .

Os polinômios apresentados na Tabela 44 são utilizados para que seja considerado o comportamento inicial dos fluxos de gases, com o máximo ocorrendo nos primeiros anos (3-5 anos) e decrescendo ao longo dos demais anos (a partir do 8º ano considera-se a emissão como constante). Na Tabela 47, apresentam-se os resultados obtidos por unidade (pu), com relação à emissão média de tCO_{2eq} .

Tabela 47 – Taxa de emissões iniciais de fluxos de gases nos primeiros dez anos.

Estágio	1ºAno (pu)	2ºAno (pu)	3ºAno (pu)	4ºAno (pu)	5ºAno (pu)	6ºAno (pu)	7ºAno (pu)	8ºAno (pu)	9ºAno (pu)	10ºAno (pu)
Taxa de Emissão	0,00	0,20	12,00	20,00	10,18	4,69	2,01	1,00	1,00	1,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

A média de emissões adicionais mensais nos primeiros dez anos de operação é calculada e distribuída ao longo do período de concessão da central hidrelétrica. Considerando-se uma concessão de 30 anos, a média mensal de emissões adicionais de poluentes é de 4.022 $tCO_{2eqGWP\ 28}$ e de 3.102 para $tCO_{2eqGWP\ 7,6}$; somando-se ao valor médio das emissões permanentes, obtém-se o total de 282.050 $tCO_{2eq}/mês$ para GWP 28 e 217.559 $tCO_{2eq}/mês$ para GWP 7,6.

O efeito das emissões dentro do período de concessão no estudo da viabilidade do projeto é considerado, a fim de garantir que sejam contabilizados os efeitos do enchimento do reservatório no período de amortização do capital investido.

A Tabela 48 apresenta os parâmetros para o cálculo do período de amortização do capital investido (*pay-back*).

Tabela 48 – Parâmetros para cálculo do período de amortização do capital investido.

Parâmetros de Operação	Valor	Unidade
Preço da Eletricidade	0,045	[US\$/kWh]
Eletricidade Produzida	260.000	[kW]

Horas de Operação Anual	5.300	[h]
Fator de Anuidade (10/15/20a)	0,177/0,134/0,124	[-]
Custo de Operação/Manutenção	0,01	[US\$/kWh]
<i>Pay-back</i>	10, 20 e 30	[anos]
Taxa de Juros (Anual)	12	[%]
Custo de Investimento (Estimado)	1200	[US\$/kW]

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 49 apresenta os parâmetros para o cálculo da eficiência ecológica.

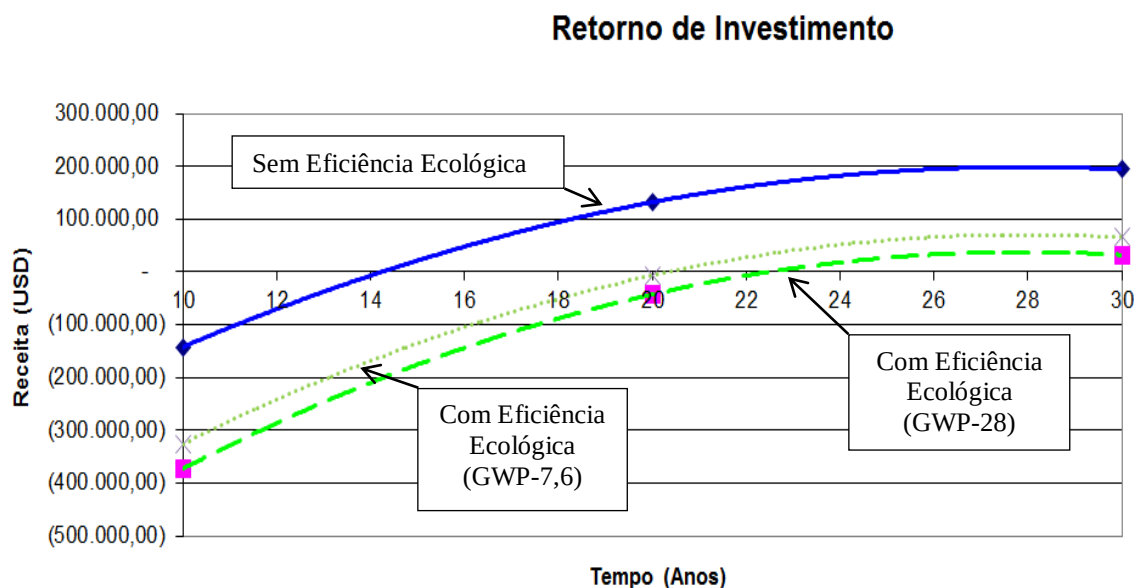
Tabela 49 – Parâmetros para cálculo da eficiência ecológica.

Parâmetros de Eficiência Ecológica	Valor GWP - 7,6	Valor GWP-28	Unidade
m_{H_2O}	347.720	347.720	[kg/s]
E_p	260.000.000	260.000.000	[J/s]
m_{CO_2}	83,93	108,84	[kg/s]
CO_{2eq}	0,00024139	0,00031302	[kg.CO ₂ /kg H ₂ O]
E_{Hid}	0,00074773	0,00074773	[MJ/kg]
η_ρ	0,90	0,90	[-]
π_{gHid}	0,3228	0,4186	[kg CO ₂ /MJ]
ε	0,86	0,83	[-]

Fonte: Elaborada pelo autor.

Calcula-se o período de amortização do capital investido em dois cenários: com e sem o impacto da eficiência ecológica. A Figura 58 apresenta os resultados desse estudo.

Figura 58 – Período de amortização do capital investido: com e sem a eficiência ecológica.



Fonte: Elaborada pelo autor

Observa-se que o empreendimento é impactado em aproximadamente 6 anos no *pay-back*, no cenário com GWP igual a 7,6 vezes. Quando se ajusta o cenário para GWP igual a 28 vezes, impacta-se o período de amortização do capital investido em mais de 3 anos. Tal fato demonstra o quanto o índice de potencial de aquecimento global influencia nas emissões e no cálculo da viabilidade econômica.

Ao analisar o projeto hipotético, verifica-se outra forma de considerar o impacto da eficiência ecológica sob o aspecto do custo do investimento. Baseando-se na Equação (36) e nos valores obtidos das eficiências ecológicas, iguais a 0,83 para GWP 28 e 0,86 para GWP 7,6, os custos adicionais a serem majorados são de 20% e de 16% (inverso da eficiência), respectivamente. Os custos adicionais representam as tomadas de decisões que visem mitigar os efeitos das emissões de GEE dos reservatórios.

CONCLUSÕES

Neste trabalho de tese desenvolveu-se uma metodologia para análise das emissões de GEE em reservatórios hidrelétricos, considerando a eficiência ecológica por meio de um indicador de poluição. Este indicador depende da estimativa das emissões equivalentes de tCO_2 , a qual está relacionada com a carga do reservatório e a qualidade da água, definida pelo parâmetro $OD_{Sat}\%$.

No intuito de possibilitar que as análises realizadas fossem as mais realistas possíveis, os reservatórios das Usinas de Itaipu e Tucuruí foram modelados utilizando dados reais encontrados na Literatura, sendo estes modelos de grande importância na determinação dos equacionamentos das emissões equivalentes de tC e tCO_2 . Os resultados obtidos através da equação de tC equivalente das Usinas de Serra da Mesa e de Três Marias foram altamente satisfatórios ao serem comparados com os do inventário do MCT, apresentando diferenças de +7 % e -5 %, respectivamente.

Devido à importância e à preocupação cada vez maior da sociedade com o meio ambiente e a sustentabilidade, é imprescindível a incorporação de um índice que represente o impacto ambiental na análise econômica dos empreendimentos, como a eficiência ecológica em centrais hidrelétricas, que indica quão poluidor é o processo produtivo de geração de eletricidade, tendo um impacto direto na avaliação do tempo de amortização do capital investido (*pay-back*).

Mostrou-se apropriada a inclusão da eficiência ecológica na análise econômica do empreendimento hipotético, sendo utilizados dois cenários: um considerava o impacto da eficiência ecológica e outro não. Verificou-se que o período de amortização do capital investido, no cenário com GWP igual a 7,6 vezes, foi de um aumento de aproximadamente 6 anos; ajustando-se o cenário para GWP igual a 28 vezes, o período de amortização do capital investido foi acrescido em 3 anos. Esses resultados demonstraram que o índice de potencial de aquecimento global influencia diretamente nas emissões equivalentes e, consequentemente, na eficiência ecológica e no cálculo da viabilidade econômica.

Sob a perspectiva do impacto da eficiência ecológica no custo de investimento, verificou-se a equivalente majoração dos custos com base nos valores obtidos das eficiências ecológicas de 0,86 para GWP 7,6 e 0,83 para GWP 28. Os respectivos custos adicionais foram de 16 % e 20 % (inverso da eficiência), comprovando que esses custos devem ser utilizados para a tomada de ações que minimizem os efeitos das emissões de poluentes dos reservatórios.

Portanto, o trabalho apresentado contribui tanto para o meio científico quanto para as empresas de geração de energia hidrelétrica ao apresentar uma metodologia que considera o impacto ambiental da fonte geradora de energia através da estimativa das emissões de poluentes dos reservatórios, considerando o regime de operação da planta hidrelétrica e a qualidade da água a partir do $OD_{sat}\%$.

Conclui-se que o conceito da ferramenta computacional desenvolvida pode ser aplicado em outros estudos específicos para determinação de emissões de GEE de reservatórios hidrelétricos e que a utilização da analogia elétrica no regime de operação pode ser aplicada para modelagem de outras fontes de energia, pois os resultados nas simulações neste trabalho de tese mostraram-se eficientes na determinação dos equacionamentos das emissões de GEE.

Considerando que as centrais hidrelétricas são as mais importantes fontes de geração de energia elétrica do país, entende-se que mais estudos devem ser realizados. Como sugestões para trabalhos futuros, são propostos temas relacionados a:

- um modelo biogeoquímico que alie o comportamento das reações químicas no interior do reservatório, relacionando-o com parâmetros de regime de operação e qualidade da água;
- um sistema de monitoramento das emissões nos reservatórios que inclua as variáveis de regime de operação e os parâmetros da qualidade da água, buscando aprimorar as estimativas equivalentes de GEE, uma vez que o tema “monitoramento” ainda carece de maiores discussões. Essa ferramenta auxiliaria em ações que busquem a melhora da operação e da qualidade da água, por tratar-se de um bem de utilidade pública que é essencial para o ser humano.

REFERÊNCIAS

ALSTOM. **Francis Hydro Turbines**. 2014b. Disponível em: <<http://www.alstom.com/products-services/product-catalogue/power-generation/renewable-energy/hydro-power/hydro-turbines/francis-hydro-turbines/>> Acesso em: 22 dez. 2014

_____. **Kaplan Hydro Turbines**. 2014c. Disponível em: <<http://www.alstom.com/products-services/product-catalogue/power-generation/renewable-energy/hydro-power/hydro-turbines/kaplan-hydro-turbines/>> Acesso em: 22 dez. 2014

_____. **Pelton Hydro Turbines**. 2014a. Disponível em: <<http://www.alstom.com/products-services/product-catalogue/power-generation/renewable-energy/hydro-power/hydro-turbines/pelton-hydro-turbines/>> Acesso em: 22 dez. 2014

BRAGA, L.B. **Análise Econômica do Uso de Célula a Combustível para Acionamento de Ônibus Urbano**. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Transmissão e Conversão de Energia) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil - 2013**. 2013a. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/ANA_Conjuntura_Recursos_Hidricos_Brasil/ANA_Conjuntura_Recursos_Hidricos_Brasil_2013_Final.pdf>. Acesso em: 28 set. 2014.

_____. **Indicadores de qualidade - índice de qualidade das águas (IQA)**. Disponível em: <http://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx#_ftn4>. Acesso em: 15 jan 2015.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ª Ed. Brasília: ANEEL, 2008. 236 p.

BRASIL. ELETRONORTE. **Usina hidrelétrica Balbina**. Disponível em: <<http://www.eln.gov.br/>>. Acesso em: 13 set. 2014.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Emissões de Dióxido de Carbono e de Metano pelos Reservatórios Hidrelétricos Brasileiros**. 2006a. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0008/8855.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2011.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano decenal de expansão de energia 2022 – Geração de energia elétrica.** 2013b. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PDEE/20140124_1.pdf>. Acesso em: 28 set. 2014.

_____. **Projeto da usina hidrelétrica de Belo Monte fatos e dados.** 2011b. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/belomonte/BELO_MONTE_-_Fatos_e_Dados.pdf>. Acesso em: 28 set. 2012.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano.** 2006b. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/vigilancia_controle_qualidade_agua.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2012.

BRASIL. Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Séries históricas de vazões.** 2011a. Disponível em: <http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx>. Acesso em: 04 jan. 2013.

CARDU, M.; BAICA, M. Regarding a Global Methodology to Estimate the Energy-Ecologic Efficiency of Thermopower Plants. **Energy Conversion and Management**, v.40, p. 71-87, 1999.

CARVALHO, G. A. **Estudo temporal da estratificação no reservatório da Usina Hidrelétrica de Itaipu e suas influências nos drenos de fundação da barragem de concreto (estudo de longo período).** 2011. 152 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do ABC, Santo André, 2011.

ELETROBRAS. **Na trilha da Energia. Linha do tempo da energia.** 2010. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/services/eletrobras/trilhaenergia/pdfs/Linha-do-tempo-da-energia.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2015.

ETTERN/IPPUR/UFRJ. **Observatório sócio-ambiental de barragens.** 2014. Disponível em: <<http://www.observabarragem.ippur.ufrj.br/>>. Acesso em: 13 set. 2014.

FEARNSIDE, P. M. Greenhouse-gas emissions from Amazonian hydroelectric reservoirs: the example of Brazil's Tucuruí Dam as compared to fossil fuel alternatives. **Environmental Conservation**, v.24, p. 64–75, 1997.

_____. Greenhouse gas emissions from a hydroelectric reservoir (Brazil's Tucuruí Dam) and the energy policy implications. **Water, Air and Soil Pollution**, v.133(1-4), p. 69-96, 2002.

_____. Greenhouse Gas Emissions from Hydroelectric Dams: Controversies Provide a Springboard for Rethinking a Supposedly “Clean” Energy Source: An Editorial Comment. **Climatic Change**, v.66 (1-2), p.1–8, 2004.

_____. Do hydroelectric dams mitigate global warming? The case of Brazil's Curuá-Una Dam. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v.10(4), p. 675-691, 2005.

_____. Hidrelétricas como “fábrica de metano”: o papel dos reservatórios em áreas de floresta tropical na emissão de gases de efeito estufa. **Oecol. Bras.**, v.12 (1), p. 100-115, 2008.

_____. Emissões de Gases de Efeito estufa dos reservatórios de hidrelétricas: Implicações de uma lei de potencia. **Oecologia Australis**, v.15 (2), p. 199-212, 2011.

FERREIRA, V.V.M.; MARTINEZ, C.B.; VERSIANI, B.R. Avaliação das Emissões de Gases de Efeito Estufa Derivadas de Reservatórios de Usinas Hidrelétricas em Minas Gerais. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.11(3), p. 113-122. 2006.

FLOGLIATTI, M.C.; CAMPOS, V.B.G.; FERRO, M.A.C., SINAY, L. e CRUZ, I. **Sistema de gestão ambiental para empresas**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011. 150 p.

FURNAS. **Esquema típico de hidrelétrica**. 2013a. Disponível em: <<http://www.furnas.com.br/>>. Acesso em: 13 set. 2014.

FURNAS. **Usina hidrelétrica de Serra da Mesa**. 2013b. Disponível em: <http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemapfurnas/usina_hidr_serramesa.asp>. Acesso em: 02 nov. 2014.

GOMES, M.V.T. **Estudo da ocorrência de metais traço em sedimentos superficiais do rio São Francisco à montante e à jusante da represa de Três Marias, Minas Gerais, Brasil**. 2009. 83 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2009.

GOOGLE MAPS. 2015. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: 15 jan. 2015

HYDROBYTE SOFTWARE. **HydroExpert**. 2014. Disponível em: <<http://www.hydrobyte.com.br/site/en/hydroexpert>>. Acesso em: 05 jan. 2014.

HYDRO EQUIPMENT ASSOCIATION (HEA). **The global Hydro Equipment Association**. 2011. Disponível em: < <http://www.thehea.org> > Acesso em: 02 jan. 2015.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change: The IPCC Scientific Assessment**. Houghton, J. T.; Jenkins, G. J. & Ephraim, J. J. (Ed.). Cambridge: Cambridge University Press. 1990.

_____. **Climate change 2014: Mitigation of Climate Change**. 2014. Disponível em: < <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/> >. Acesso em 27 dez. 2014.

INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION (IHA). **GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs**. 2010. Disponível em: <<http://www.hydropower.org/ghg-measurement-guidelines-for-freshwater-reservoirs>> Acesso em: 12 dez 2014.

_____. **GHG Risk Assessment Tool (Beta Version) User Manual**. 2012. Disponível em: <<http://www.hydropower.org/greenhouse-gas-emissions>>. Acesso em: 17 dez 2014.

ITAIPU. **Usina hidrelétrica Itaipu**. Disponível em: <<http://www.itaipu.gov.br/>>. Acesso em: 13 set. 2014.

JØRGENSEN, S. E. State-of-the-art of ecological modelling with emphasis on development of structural dynamic models. **Ecological Modelling**, v.120, p.75–96, 1999

_____. Overview of the model types available for development of ecological models. **Ecological Modelling**, v.215, p.3-9, 2008.

LEITE, M. et al. Tudo sobre a batalha de Belo Monte. **Folha de São Paulo**. 2013. Disponível em: <<http://arte.folha.uol.com.br/especiais/2013/12/16/belo-monte/>>. Acesso em 07 jan. 2015.

LOUZADA, A.F. **Avaliação da qualidade da água do reservatório da usina hidrelétrica de Tucuruí**. 2005. 91 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Ambiental) - Centro de Ciências Naturais e Tecnologia - Universidade do Estado do Pará, Belém, 2005.

MÄKINEN, K., KHAN, S. Policy considerations for greenhouse gas emissions from freshwater reservoirs. **Water Alternatives**, v. 3(2), p. 91-105, 2010.

MILLER, G. T. **Ciências Ambientais**. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 501 p.

MINAS GERAIS (Estado). Companhia Energética de Minas Gerais. **50 anos de Três Marias**. 2012. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/sites/Imprensa/pt-br/publicacoes/Documents/Energia%20da%20Gente/EG91_final.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2014.

MIRANDA, R.L. **Regulação técnica para se obter melhor eficiência na motorização de pequenas centrais hidrelétricas no Brasil**. 2009. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Regulação da Indústria de Energia) – Universidade Salvador (UNIFACS), Salvador – BA, 2009.

NETO, C.A.M.F.; FRANCO, H.C.B.; REZENDE, P.F.V.S. AHE Belo Monte – Evolução dos Estudos. In: XXVII SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 27., 2007, Belém – PA. **Anais do XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens**, 2007.

ORAM, B. **The Water Quality Index**. 2011. Disponível em: < <http://www.water-research.net/watrqualindex/index.htm> >. Acesso em: 2 nov 2011.

PEIXOTO, R.H.P.B.; OLIVEIRA, D.A.; ARAÚJO, C.C; BARROS, E.O. Qualidade da Água do Rio Tocantins a jusante da Usina Hidrelétrica Serra da Mesa. In: SODEBRAS - CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 28., 2002, Cancun – Mexico. **Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental - AIDIS**, 2002.

ROSA, L. P.; SANTOS, M. A.; MATVIENKO, B.; SANTOS, E. O.; SIKAR, E. Greenhouse Gas Emissions from Hydroelectric Reservoirs in Tropical Regions. **Climatic Change**, v.66, pp.9–21, 2004.

ROSA, L. P.; SCHAEFFER, R. Global Warming Potentials: The case of emissions from dams. **Energy Policy**, v.23, pp.149–158, 1995.

RUDD, J. W. M.; HARRIS, R.; KELLY, C. A. Are Hydroelectric Reservoirs Significant Sources of Greenhouse Gases? **Ambio**, v.22 (4), p. 246-248, 1993.

SANTOS, M. A. dos, et al. Emissões de gases de efeito estufa por reservatórios de hidrelétricas. **Oecol. Bras.**, v.12 (1), p. 116-129, 2008.

SANTOS, M.A. et al. Emissões de gases de efeito estufa por reservatórios de hidrelétricas. **Oecol. Bras.**, v.12 (1), p. 116-129, 2008.

SANTOS, M.A. et al. Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants. **Energy Policy**, v. 34(4): p. 481-488, 2006.

SÃO PAULO (Estado). Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A. **Usina hidrelétrica Henry Borden**. Disponível em: <<http://www.emae.com.br/conteudo.asp?id=Usina-Hidroeletrica-Henry-Borden>>. Acesso em: 13 set. 2014.

SÃO PAULO (Estado). Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). **Variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos**. 2009. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/agua/aguas-superficiais/variaveis.pdf>> Acesso em: 17 de jan 2015.

SCHREIBER, G.P. **Usinas hidrelétricas**. Rio de Janeiro: Edgard Blücher, 1978.

SIMONE, G.A. **Centrais e aproveitamentos hidrelétricos**. São Paulo: Erica, 2000.

SIQUEIRA, R.B.P. ; SILVEIRA, J.L. Construção de Diagramas de Custos de PCH'S Incorporando Turbinas Hidráulicas de Mercado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 4., 2004, Porto de Galinhas. **Anais do IV Simpósio Brasileiro de Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas**, 2004.

_____. Análise de Eficiência Energética Aplicada a uma Pequena Central Hidrelétrica aliada ao Retorno de Investimento. In: INTERNATIONAL SODEBRAS CONGRESS, 24., 2010, São Paulo. **Sodebras**, 2010.

_____. Eficiência Ecológica Aplicada a uma PCH em Função da Operação de um Reservatório Hipotético. In: CONFERÊNCIA DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 7., 2011, São Paulo. **Anais da VII Conferência de Centrais Hidrelétricas**, 2011.

SIQUEIRA, R.B.P. **Construção de diagramas de custos para PCH incorporando turbinas de mercado**. 2006. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Transmissão e Conversão de Energia) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

St. LOUIS, V. L., et al. Reservoir Surfaces as Sources of Greenhouse Gases to the Atmosphere: A Global Estimate. **BioScience**, v.50 (9), 2000.

THA, P.C. **Estudo das Condições de Fluxo pela Barragem de Terra da Margem Esquerda de Itaipu**. 2007. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2007.

THEMAG ENGENHARIA. **Usinas e aproveitamentos hidroelétricos**. Disponível em: < <http://www.themag.com.br/pdf/usina.pdf>>. Acesso em: 04 out. 2014.

TUCURUÍ. **Usina hidrelétrica Tucuruí**. 2013. Disponível em: <http://cidadedetucurui.com/inicio/usina_hidreletrica_tucurui/USINA_HIDRELETRICA_TUCURUI.htm>. Acesso em: 17 jul. 2014.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO). **Assessment of the GHG status of freshwater reservoirs**. 2008. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001817/181713e.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2014.

VILLELA, I.A. de C.; SILVEIRA, J.L.. Ecological efficiency in thermoelectric power plants. **Applied Thermal Engineering**, v. 27, p. 840-847, 2007.

VILLELA, I.A. de C. **Desenvolvimento de um modelo termoeconômico que considera os impactos ambientais**. 2007. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Transmissão e Conversão de Energia) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

WORLD COMMISSION ON DAMS (WCD). **Ecosystems and Large Dams: Environmental Performance**. 2000. Disponível em: < <http://www.unep.org>>. Acesso em 05 jan 2015.