



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de

Recursos Hídricos

Flavio Augusto Settimi Sohler

**Metodologia de avaliação de riscos para reservatórios: aspectos de  
qualidade de água**

Rio de Janeiro

2024

Flavio Augusto Settimi Sohler

**Metodologia de avaliação de riscos para reservatórios: aspectos de  
qualidade de água**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROF-ÁGUA), na Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Regulação e governança de recursos hídricos. Linha de pesquisa: Segurança hídrica e usos múltiplos da água.

Orientador: Prof. Dr. Friedrich Wilhelm Herms

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

S682 Sohler, Flavio Augusto Settimi.  
Metodologia de riscos para reservatórios: aspectos de qualidade de  
água / Flavio Augusto Settimi Sohler. – 2024.  
165 f. : il.

Orientador: Friedrich Wilhem Herms.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro,  
Centro de Tecnologia e Ciências.

1. Recursos hídricos - Teses. 2. Água - Qualidade – Teses. 3.  
Reservatórios - Teses. 4. Gestão ambiental – Teses. 5. Avaliação de  
riscos – Teses. I. Herms, Friedrich Wilhem. II. Universidade do Estado  
do Rio de Janeiro. Centro de Tecnologia e Ciências. III. Título.

CDU: 556.18

Bibliotecária Responsável: Priscila Freitas Araujo/ CRB-7: 7322

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta  
dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Flavio Augusto Settimi Sohler

## **Metodologia de avaliação de riscos para reservatórios: aspectos de qualidade de água**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROF-ÁGUA), na Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Regulação e governança de recursos hídricos. Linha de pesquisa: Segurança hídrica e usos múltiplos da água.

Aprovada em 19 de março de 2024.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Friedrich Wilhelm Herms (Orientador)

Instituto de Oceanografia - UERJ

---

Prof. Dr. Francisco de Assis Dourado da Silva

Faculdade de Geologia - UERJ

---

Prof. Dr. José Roberto Ribas

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Rio de Janeiro

2024

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE No. 2717/2015 e à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) pelo apoio técnico científico e aporte financeiro.

Agradeço à UERJ e a meu orientador, prof. Friedrich Herms pela condução e ensinamentos durante esta jornada e a todos os maravilhosos professores que tive a honra de conhecer. Agradeço aos professores Francisco Dourado e Cláudia Hamacher do ProfÁgua UERJ e ao professor José Roberto Ribas da UFRJ por terem aceitado o convite para participar de minha qualificação e da banca final. Agradeço aos professores Francisco Dourado e Décio Tubbs do ProfÁgua UERJ por terem aceitado o convite para participar de minha pré-banca.

Agradeço à minha família pelo apoio e compreensão nas minhas horas de ausência.

Agradeço ao meu gerente de departamento Renato Marques Cabral da Eletrobras Furnas pelo apoio sempre constante nos projetos e atividades do departamento.

## RESUMO

SOHLER, Flavio Augusto Settimi. **Metodologia de riscos para reservatórios**: aspectos de qualidade de água. 2024. 165 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - PROF-ÁGUA), Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Riscos são inerentes de qualquer atividade, devem ser gerenciados e nunca negligenciados. São mensurados pela sua probabilidade de acontecer e seu impacto na ocorrência. Existem inúmeros estudos sobre riscos em barragens, projetos, construção, montagens de equipamentos, dentre outros. No entanto, ainda existe uma lacuna a ser desenvolvida sobre metodologia específica de avaliação de riscos para reservatórios e que carece maiores estudos e análises. Os reservatórios que são parte integrante dos empreendimentos hidroelétricos possuem a finalidade de acúmulo de água para geração de energia, principalmente no período de seca ou estiagem e necessitam ser melhor entendidos, estudados e analisados, especificamente no tocante aos riscos. No Brasil, nas duas últimas décadas, já aconteceu escassez hídrica em vários estados. O objetivo desta dissertação é elaborar uma metodologia de avaliação de riscos para reservatórios. Como produtos principais são: metodologia de avaliação de riscos para reservatórios, planilha de cálculo para automatização da metodologia, *frameworks* para identificação de riscos, e a metodologia de riscos para segurança de barragens. A metodologia será elaborada nas seguintes etapas: 1. Análise da bibliografia nacional e internacional sobre o tema; 2. Elaboração da metodologia de avaliação para segurança de barragens; 3. Elaboração de análises de riscos através dos *frameworks Event Tree Analysis (ETA)*, *Failure Mode, Effect and Criticality Analysis (FMECA)* e Ishikawa e 4. Elaboração da metodologia de avaliação de riscos para reservatórios e o desenvolvimento da planilha para automatização do cálculo da metodologia.

Palavras-chave: análise de riscos; metodologia; probabilidade e impacto; recursos hídricos; riscos.

## ABSTRACT

SOHLER, Flavio Augusto Settimi. **Risk assessment methodology for reservoirs: water quality aspects.** 2024. 165 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - PROF-ÁGUA), Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Risks are inherent in any activity, they must be managed and never neglected. They are measured by their probability of happening and their impact on the occurrence. There are numerous studies on dam risks, projects, construction, equipment assembly, among others. However, there is still a gap to be developed regarding the specific risk assessment methodology for reservoirs, which requires further studies and analysis. The reservoirs that are an integral part of hydroelectric projects have the purpose of accumulating water for energy generation, especially in the dry or dry season and need to be better understood, studied and analyzed, specifically with regard to risks. In Brazil, in the last two decades, water shortages have already occurred in several states. The objective of this dissertation is to develop a risk assessment methodology for reservoirs. As main products are: the risk assessment methodology for reservoirs, spreadsheet for automating the methodology, frameworks for risk identification and the risk methodology for dam safety. The methodology will be developed in the following steps: 1. Analysis of the national and international bibliography on the subject; 2. Elaboration of the assessment methodology for dam safety; 3. Elaboration of risk analyzes using the Event Tree Analysis (ETA), Failure Mode, Effect and Criticality Analysis (FMECA) and Ishikawa frameworks and 4. Elaboration of the risk assessment methodology for reservoirs and the development of the spreadsheet for automating the calculation of the methodology.

Keywords: risk analysis; methodology; likelihood and impact; water resources; risks.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Capacidade instalada por fonte energética.....	25
Figura 2 –	Linha do tempo das UHEs no Brasil de 1889 até 1961.....	26
Figura 3 –	Linha do tempo das UHEs no Brasil de 1962 até 2020.....	27
Figura 4 –	Número de desastres naturais por região de 1985 a 2015.....	40
Figura 5 –	Número de desastres naturais por tipo de 1995 a 2015.....	41
Figura 6 –	Eventos de falhas no mundo de 1910 a 2010.....	42
Figura 7 –	Evolução do número de acidentes e incidentes no Brasil.....	43
Figura 8 –	Perspectivas de uma sociedade orientada a segurança e ao risco.....	44
Figura 9 –	Framework para gestão de riscos de barragens.....	45
Figura 10 –	Framework para gestão de riscos organizacionais.....	46
Figura 11 –	Cubo do COSO II - ERM.....	47
Figura 12 –	Indicadores de riscos de desastres.....	48
Figura 13 –	Fases do ciclo de vida de um empreendimento UHE.....	50
Figura 14 –	Fases do ciclo de vida, licenças, responsabilidade e duração.....	51
Figura 15 –	Etapas dos estudos e projetos para implantação de um AHE.....	52
Figura 16 –	Vazão em diferentes UHEs no Brasil.....	53
Figura 17 –	Vazões nas regiões Sudeste, Nordeste, Norte e Sul.....	54
Figura 18 –	Arranjo da Política Nacional de Segurança de Barragens.....	55
Figura 19 –	Características de barragem enquadrada na Lei 12334:2010.....	57
Figura 20 –	Pilares da Lei 12334:2010.....	58
Figura 21 –	Esquema do cálculo do Valor Esperado.....	59
Figura 22 –	Matriz e funcionamento do arranjo do SINGREH.....	60
Figura 23 –	Hierarquização funcional de uma barragem.....	62
Figura 24 –	Exemplo de ETA de um potencial perigo (intensa precipitação) .....	66
Figura 25 –	Mapa com as usinas e linhas de transmissão.....	69
Figura 26 –	Etapas do desenvolvimento da dissertação.....	72
Figura 27 –	Matriz de riscos da Metodologia de Análise de Riscos de Barragens da Eletrobras Furnas.....	90



Figura 28 – Diagrama Ishikawa para riscos internos e externos.....	94
Figura 29 – Diagrama Ishikawa para riscos estruturais.....	95
Figura 30 – Diagrama Ishikawa para riscos da má qualidade da água.....	96
Figura 31 – Critérios propostos para a curva F-N.....	96
Figura 32 – ETA para a probabilidade de ocorrência do piping.....	98
Figura 33 – Árvore de eventos I – Erosão por galgamento (sem instrumentação).....	99
Figura 34 – Árvore de eventos I – Erosão por galgamento (com instrumentação).....	100
Figura 35 – Riscos para automóveis devido a inundações.....	107
Figura 36 – Riscos para casas devido a inundações.....	107
Figura 37 – Riscos para pessoas devido a inundações.....	107

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Exemplos de riscos.....	29
Quadro 2 –	Exemplos de riscos de rompimento de barragens de mineração.....	30
Quadro 3 –	Exemplos de riscos de galgamento que contribuíram para o rompimento de barragens de geração de energia.....	31
Quadro 4 –	Exemplos de riscos geotécnicos que contribuíram para o rompimento de barragens de geração de energia.....	34
Quadro 5 –	Exemplos de riscos colapsos estruturais que contribuíram para o rompimento de barragens de geração de energia.....	36
Quadro 6 –	Definições de fator deflagrador, processo perigoso, susceptibilidade, elementos expostos e exposição.....	49
Quadro 7 –	Definições: perda, dano, impactos, intensidade, vulnerabilidade, mitigação.....	49
Quadro 8 –	Exemplo de FMEA.....	62
Quadro 9 –	Classes de probabilidade.....	63
Quadro 10 –	Classes de severidade.....	64
Quadro 11 –	Índices das classes de probabilidade.....	65
Quadro 12 –	Índices das classes de impacto.....	65
Quadro 13 –	Exemplo de FMECA.....	66
Quadro 14 –	Portfólio de barragens – Antes da validação da metodologia.....	81
Quadro 15 –	Portfólio de barragens – Após a validação da metodologia.....	84
Quadro 16 –	Portfólio de barragens ordenado por Potencial de Risco.....	89
Quadro 17 –	Classes PP + VP.....	90
Quadro 18 –	Classes IP.....	90
Quadro 19 –	Classes, faixas e significados da MARR.....	91
Quadro 20 –	Nível de aceitabilidade de ruptura de barragem.....	97
Quadro 21 –	Classes de severidade, probabilidade e impacto.....	101
Quadro 22 –	FMECA para o pH.....	101
Quadro 23 –	Documentos pesquisados para decisão das variáveis incluídas.....	103
Quadro 24 –	Variável ANA.....	106
Quadro 25 –	Critérios de condições não perigosas devido a inundações.....	108

Quadro 26 –	Variável velocidade.....	108
Quadro 27 –	Susceptibilidade a erosão.....	110
Quadro 28 –	Potencial ao assoreamento.....	110
Quadro 29 –	Potencial de produção de sedimentos.....	111
Quadro 30 –	Posição relativa na cascata.....	111
Quadro 31 –	Regime de operação no reservatório.....	111
Quadro 32 –	Magnitude e importância dos efeitos do assoreamento .....	111
Quadro 33 –	Nível de criticidade.....	112
Quadro 34 –	Nível de criticidade para rios.....	112
Quadro 35 –	Variável estabilidade de taludes.....	113
Quadro 36 –	Variável volume definida para reservatórios.....	114
Quadro 37 –	Nível de toxicidade em organismos aquáticos.....	114
Quadro 38 –	Turbidez da água.....	115
Quadro 39 –	Nível de pH.....	116
Quadro 40 –	Cor da água.....	116
Quadro 41 –	Valores máximos permitidos para os parâmetros inorgânicos.....	117
Quadro 42 –	Variáveis incluídas no IQA-CETESB e sua representação na MARR...	118
Quadro 43 –	Presença de indicadores inorgânicos (PII).....	118
Quadro 44 –	Valores máximos permitidos para os parâmetros geoquímicos e inorgânicos.....	120
Quadro 45 –	Presença de indicadores geoquímicos e orgânicos (PIGO).....	120
Quadro 46 –	Nível de demanda bioquímica de oxigênio (DBO).....	121
Quadro 47 –	Nível de oxigênio dissolvido (NOD) para mg/L O <sub>2</sub> .....	122
Quadro 48 –	Nível de coliformes fecais (COF).....	123
Quadro 49 –	Temperatura (TEM).....	125
Quadro 50 –	Sólidos dissolvidos totais (SDT).....	125
Quadro 51 –	Existência ou não de sistema de aviso e alerta (SAA).....	126
Quadro 52 –	Existência ou não de tratamento de esgoto (ETE).....	126
Quadro 53 –	Variável impacto econômico a jusante.....	127
Quadro 54 –	Variável impacto social a jusante.....	127
Quadro 55 –	Variável impacto ambiental a jusante.....	128
Quadro 56 –	Variáveis do IMARR.....	129

Quadro 57 –	Classes, escala e faixas do IMARR.....	130
Quadro 58 –	Índice da Metodologia de Avaliação de Riscos para Reservatórios (IMARR).....	130
Quadro 59 –	Pesos do IMARR.....	132
Quadro 60 –	Formação e quantidade de especialistas.....	132
Quadro 61 –	Votos por relevância.....	133
Quadro 62 –	Dissertações do Prof.Água UERJ analisadas.....	135
Quadro 63 –	Média da pontuação das variáveis.....	136
Quadro 64 –	Peso médio, pesos temporários e finais das variáveis.....	137
Quadro 65 –	Nota mínima, máxima e IMARR.....	138
Quadro 66 –	Classes, escala e faixas finais do IMARR.....	139
Quadro 67 –	Classes, escala e faixas finais normalizadas do IMARR.....	139
Quadro 68 –	Índice atualizado da Metodologia de Avaliação de Riscos para Reservatórios (IMARR).....	140

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAI	Avaliação Ambiental Integrada
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHE	Aproveitamento Hidroelétrico
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANM	Agência Nacional de Mineração
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CERH	Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos
CGU	Controladoria Geral da União
COSO	Committee of Sponsoring of the Treadway Commission
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DPA	Dano Potencial Associado
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ERM	Enterprise Risk Management
ETA	Event Tree Analysis
FMECA	Failure Mode and Effect Analysis
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IMARR	Índice da Metodologia de Avaliação de Riscos para Reservatórios
IN	Instruções Normativas
ISO	International Standard Organization
IT	Instruções Técnicas
LI	Licença de Instalação
LO	Licença de Operação
LP	Licença Prévia
MARR	Metodologia de Avaliação de Riscos para Reservatórios
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MME	Ministério das Minas e Energia

MP	Ministério Público
OEMA	Órgãos Estaduais de Meio Ambiente
OERH	Órgãos Estaduais de Recursos Hídricos
PAE	Plano de Ações de Emergência
PMI	Project Management Institute
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança de Barragem
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RLP	Renovação da Licença de Operação
RSB	Relatório de Segurança de Barragens
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
SNSH	Secretaria Nacional de Segurança Hídrica
TCU	Tribunal de Contas da União
UHE	Usina Hidroelétrica
VE	Valor Esperado
VME	Valor Monetário Esperado

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
1	<b>QUESTÃO DE PESQUISA</b> .....	19
2	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	20
3	<b>OBJETIVOS</b> .....	21
4	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	22
4.1	<b>Definição de risco</b> .....	22
4.2	<b>Leis e Normas relacionadas a risco</b> .....	23
4.3	<b>Crescimento do Sistema Elétrico Nacional</b> .....	25
4.4	<b>Mensuração dos riscos</b> .....	27
4.5	<b>Riscos e impactos</b> .....	28
4.6	<b>Frameworks: Segurança de Barragens, ISO31000, COSO e Cemaden.....</b>	44
4.7	<b>Fases do ciclo de planejamento e construção de usinas hidrelétricas.....</b>	50
4.8	<b>Política Nacional de Segurança de Barragens.....</b>	55
4.9	<b>Política Nacional de Recursos Hídricos.....</b>	59
4.10	<b>Frameworks para identificação de riscos: FMEA/FMECA, ETA e ISHIKAWA</b> .....	61
5	<b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....	69
6	<b>METODOLOGIA</b> .....	71
7	<b>METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO PARA SEGURANÇA DE BARRAGENS DA ELETROBRAS FURNAS</b> .....	74
8	<b>RESULTADOS</b> .....	99
9	<b>METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE RISCOS PARA RESERVATÓRIOS (MARR)</b> .....	102
9.1	<b>Quantidade de água</b> .....	105
9.1.1	<u>Altura do nível d'água (ANA)</u> .....	105
9.1.2	<u>Velocidade do rio (VER)</u> .....	106
9.1.3	<u>Assoreamento (ASS)</u> .....	109
9.1.4	<u>Estabilidade de taludes (EST)</u> .....	113
9.1.5	<u>Volume do reservatório (VOL)</u> .....	113
9.2	<b>Qualidade da água</b> .....	114

9.2.1	<u>Nível de toxicidade e organismos aquáticos (NTO)</u> .....	114
9.2.2	<u>Turbidez da água (TUA)</u> .....	115
9.2.3	<u>Nível de pH (NPH)</u> .....	115
9.2.4	<u>Cor da água (COA)</u> .....	116
9.2.5	<u>Presença de indicadores geoquímicos, orgânicos e inorgânicos (PIGOI)</u> .....	117
9.2.6	<u>Nível de demanda bioquímica de oxigênio (DBO)</u> .....	121
9.2.7	<u>Nível de oxigênio dissolvido (NOD)</u> .....	122
9.2.8	<u>Coliformes fecais (COF)</u> .....	123
9.2.9	<u>Temperatura (TEM)</u> .....	124
9.2.10	<u>Sólidos dissolvidos totais (SDT)</u> .....	125
9.3	<b>Existência de sistema de comunicação e tratamento de esgoto</b> .....	125
9.3.1	<u>Existência ou não de sistema de comunicação ou aviso e alerta (SAA)</u> .....	125
9.3.2	<u>Existência ou não de tratamento de esgoto (ETE)</u> .....	126
9.4	<b>Impacto a jusante</b> .....	126
9.4.1	<u>Impacto econômico a jusante (IEJ)</u> .....	127
9.4.2	<u>Impacto social a jusante (ISJ)</u> .....	127
9.4.3	<u>Impacto ambiental a jusante (IAJ)</u> .....	128
9.5	<b>Cálculo do resultado da Metodologia de Avaliação de Riscos para Reservatórios (MARR)</b> .....	128
10	<b>VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE RISCOS PARA RESERVATÓRIOS (MARR)</b> .....	131
	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	141
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	143
	<b>APÊNDICE – Planilha automatizada para cálculo da MARR e IMARR</b> .....	158



## INTRODUÇÃO

A água é recurso renovável essencial à vida no planeta Terra; seu ciclo tem continuado por séculos e milênios, sustentando a biodiversidade e mantendo em funcionamento ciclos nos ecossistemas, comunidades e populações. O ciclo hidrológico no planeta tem componentes bem conhecidos e integrados: águas superficiais, águas subterrâneas e águas atmosféricas (TUNDISI, 2014).

O tema da dissertação “Metodologia de Avaliação de Riscos para Reservatórios: Aspectos de qualidade de água” (MARR) abrange em específico os reservatórios, sendo os rios que integram o Aproveitamento Hidroelétrico (AHE), particularmente de interesse para o escopo deste estudo. Nesta dissertação, utiliza-se o conceito de riscos como a probabilidade de acontecer o “processo perigoso” multiplicado pelo impacto, ou seja, eventos que podem acontecer e que têm como consequência problemas que impactam os recursos hídricos superficiais como quantidade e qualidade da água. A análise de riscos é importante para entender os perigos e definir mitigações das consequências que podem ser desastrosas, seja a nível das pessoas, meio ambiente, bem como da continuidade dos negócios empresariais. Furnas já possui experiência em riscos dos empreendimentos de usinas hidroelétricas (UHE) desde 2005, incluindo riscos de projetos, barragens, construção, montagem eletromecânica, dentre outros. No entanto, existe uma lacuna de conhecimento sobre metodologia de avaliação de riscos para reservatórios, que também fazem parte dos aproveitamentos hidroelétricos (AHE) e evidentemente, podem impactar os empreendimentos.

Portanto, a problemática da dissertação, ou seja, a questão de pesquisa que será respondida é: “Como elaborar uma metodologia de riscos de qualidade que avalie adequadamente os principais problemas que possam impactar os reservatórios e conseqüentemente a geração de energia?”.

O projeto de pesquisa deverá, inicialmente, buscar bibliografia nacional e internacional, através de livros e artigos publicados em revistas técnicas e congressos. Para isso, serão consultados diversos sites descritos detalhadamente na metodologia. A segunda etapa é a elaboração de metodologia de avaliação para segurança de barragens de Furnas. A terceira etapa é a utilização das ferramentas *Event Tree Analysis* (ETA), *Failure Mode and Effect Analysis* (FMECA) e Ishikawa

para elaboração de análises de riscos, segmentação das categorias de riscos, definição dos riscos, suas causas e consequências através dos diagramas de afinidade. A elaboração da MARR e a planilha automatizada é a quarta etapa.

## 1 QUESTÃO DE PESQUISA

Através de pesquisas realizadas nos diversos sites, artigos, dissertações e teses, não foi encontrada uma metodologia de análise de riscos de qualidade para avaliação de reservatórios, a nível mundial e nacional. Os sites pesquisados foram: periódicos CAPES (disponível em: <https://www-periodicos-capes-gov-br.ezl.periodicos.capes.gov.br/index.php/buscador-primo.html>), Google Scholar ou Google Acadêmico (disponível em: <https://scholar.google.com.br/>), Science Direct (disponível em: <https://www.sciencedirect.com>), Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal do Mato Grosso (disponível em: <https://ufmt.br/ppgrh>), Pós-Graduação em Geoquímica Ambiental da Universidade Federal Fluminense (disponível em: <https://app.uff.br>) e pesquisa na base do ProfÁgua de 2016 a 2021 na Universidade Estadual do Rio de Janeiro (disponível em: [http://www.profagua.uerj.br/lista\\_dissertacao.htm](http://www.profagua.uerj.br/lista_dissertacao.htm)).

O projeto terá como resultado esta metodologia, além da planilha para automatização da metodologia, a metodologia de avaliação de riscos para segurança de barragens e os *frameworks* para identificação de riscos.

Deste modo, esta pesquisa tem o propósito de responder à seguinte questão: “Como elaborar uma metodologia de riscos de qualidade que avalie adequadamente os principais problemas que possam impactar os reservatórios e conseqüentemente a geração de energia?”.

## 2 JUSTIFICATIVA

A Eletrobras Furnas sempre teve a visão de gerenciamento dos riscos desde 2005, quando iniciou os primeiros estudos e projetos com a elaboração de procedimentos e normas de modo a estabelecer mecanismos adequados de avaliação de riscos e análise de cenários nos estudos que subsidiam o processo de tomada de decisão. Esta visão é especialmente voltada para a participação em empreendimentos, definindo margem de precisão adequada para os fatores que possam impactar nos custos, prazos, qualidade e rentabilidade esperada.

Este tema é sensível no que diz respeito às variáveis que são consideradas para a tomada de decisões, além de contribuir nas análises técnicas e econômicas para a construção dos empreendimentos hidráulicos.

Esta pesquisa pode complementar os estudos já incorporados pelas organizações como aceitos a nível mundial pela comunidade empresarial e científica atuante na área de empreendimentos hidráulicos e obviamente contribuindo para o trabalho nas áreas de construção de UHEs, gestão ambiental, ecologia e outros correlatos. A metodologia e *framework*, produtos desta pesquisa, contribuem para soluções técnicas, no sentido de antecipação aos riscos que podem acontecer.

Diante de todas estas justificativas, o tema desta dissertação é extremamente importante para elucidar lacunas atualmente existentes quanto aos riscos, suas causas e consequências, que estão relacionados aos reservatórios.

### 3 OBJETIVOS

O objetivo geral é elaborar Metodologia de Avaliação de Riscos para Reservatórios (MARR).

Os objetivos específicos são: Elaborar Metodologia de Avaliação para Segurança de Barragens da Eletrobras Furnas; Elaborar *Frameworks* de Análise de Riscos e Elaborar planilha automatizada para cálculo da MARR e IMARR.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo trata da definição do risco e daqueles que podem causar impactos nos recursos hídricos; das leis e normas referentes à riscos; do ciclo de planejamento e construção de usinas hidroelétricas e da implantação de aproveitamentos hidroelétricos; da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB); da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e dos *frameworks* para identificação de riscos como Ishikawa, ETA e FMECA.

### 4.1 Definição de Risco

Conforme aponta Bernstein (2019), a palavra risco deriva do italiano “*risicare*” que foi derivado do latim “*risicu*” ou “*riscu*” que significa “ousar”. Hall (1998) define risco como a medida da probabilidade e das perdas acarretadas pelo acontecimento de um evento que afete negativamente o projeto, o processo ou o produto em um projeto. Conrow e Shishido (1997) definem risco como a probabilidade de um projeto não atingir seus objetivos de custo, desempenho, cronograma e as consequências de não atingir este objetivo. O *Project Management Institute* (PMI, 2021) define risco como um evento ou condição incertos que, se ocorrerem, terão efeito positivo ou negativo sobre os objetivos do projeto. A *International Standard Organization* (ISO 31000:2018) define risco como um evento ou condição incerta ou o efeito da incerteza nos objetivos. Portanto, o conceito de riscos parece não existir um consenso a nível mundial, que pudesse ter uma única definição. Cada autor propõe sua definição geralmente na direção de sua área específica de aplicação. Bernstein trata risco como ousadia ou oportunidade, Hall trata como probabilidade e perdas como impacto, Conrow e Shishido tratam como probabilidade de não atingir os objetivos, o PMI e a ISO tratam riscos como incerteza nos objetivos. Alguns autores consideram apenas aspectos negativos do impacto e outros como aspectos negativos e positivos.

Segundo Fell (1994, p.261) não existe uma definição única para o gerenciamento de riscos. O autor argumenta da seguinte maneira:

Infelizmente, não existe definição geralmente aceita dos termos utilizados na avaliação de riscos... Pouco tempo após sua criação em 1981, a Sociedade Americana para Análise de Riscos, estabeleceu um comitê para definir risco. Após 3 a 4 anos de trabalho do comitê, foi publicada uma lista de 14 possíveis definições e relatou que não obtiveram um consenso. Eles recomendaram que uma única definição de risco não pode ser estabelecida, mas que cada organização deve definir sua própria definição de risco de acordo com seu trabalho (FELL, 1994, p.261).

Lathan (1994), corroborado por Assis *et al.* (2019), argumentam que nenhum projeto de construção está livre de risco e que riscos podem ser minimizados, compartilhados, transferidos ou aceitos, mas nunca ignorados.

As análises e tratamentos de riscos considerados pela Eletrobras Furnas em seus empreendimentos, tratam de riscos positivos e negativos. Os riscos positivos são as oportunidades que podem trazer ganhos para a empresa e os negativos são as ameaças que podem impactar negativamente, ou trazer perdas. No escopo desta dissertação serão considerados apenas os riscos negativos que podem impactar os reservatórios. Desta maneira, trata-se riscos de modo mais conservador, analisando especialmente o cenário pessimista, de tal modo, que se analisa o pior caso.

Riscos são inerentes de qualquer atividade e devem ser monitorados para que os objetivos das pessoas, dos negócios empresariais, dentre outros, não sejam impactados. No entanto, somente nos últimos 20 anos é que os estudos sobre riscos avançaram e trouxeram o desenvolvimento de metodologias e ferramentas para análise de riscos.

É importante observar que não obstante de todas as definições e conceitos dos mais diversos autores nacionais e internacionais, o ideal é a corporação realizar reuniões com profissionais de várias áreas no sentido de definir ela própria uma metodologia de riscos que esteja adequada a sua cultura organizacional e aos seus processos.

## **4.2 Leis e Normas Relacionadas a Riscos**

Diversas Leis e Normas foram publicadas no Brasil como a Lei de Segurança de Barragens 12.334:2010 (BRASIL, 2010) e mais recentemente, a Lei 14066:2020

(BRASIL, 2020) que estabeleceu a Política de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos com os objetivos de garantir a observância de padrões de segurança, regulamentar, promover o monitoramento, acompanhamento das ações de segurança e reduzir a quantidade de acidentes e suas consequências junto à população. Estabeleceu o Plano de Segurança de Barragens (PSB) como responsabilidade do empreendedor e como responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), o Relatório de Segurança de Barragens (RSB) e o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).

O Tribunal de Contas da União (TCU) publicou em 2014, um documento sobre Governança Pública como referencial básico de governança aplicável a órgãos e entidades da administração pública e ações indutoras de melhoria (TCU, 2014).

O Ministério Público e a Controladoria Geral da União publicaram a Instrução Normativa 01/2016 no sentido de implementar, manter, monitorar e revisar o processo de gestão de riscos e governança no âmbito do Poder Executivo Federal (MP/CGU, 2016).

A Lei das Estatais 13.303:2016 definiu a obrigatoriedade da matriz de riscos para novos empreendimentos (BRASIL, 2016).

Diante disso, a Eletrobras Furnas publicou Instruções Normativas (IN) e Instruções Técnicas (IT) internas sobre riscos em empreendimentos. Uma IN estabeleceu princípios, diretrizes e critérios para a gestão de riscos corporativos, outra IN estabeleceu a obrigatoriedade da matriz de riscos para todo novo plano de investimento. A empresa também publicou em outra IT, o estabelecimento dos processos de gestão de riscos de empreendimentos, para identificação, avaliação, tratamento, monitoramento e aprendizado, publicando o Relatório de Priorização de Eventos de Riscos Corporativos.

É importante salientar que esta dissertação utilizou como conhecimentos básicos para o seu desenvolvimento, as seguintes disciplinas do curso de mestrado profissional Prof. Água da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ): Biogeoquímica de Ambientes Estuarinos, Climatologia e Meteorologia Aplicada a Recursos Hídricos, Desastres Naturais e Quantificação do Risco, Economia em Recursos Hídricos, Geotecnologias Aplicadas aos Recursos Hídricos, Governança e Regulação das Águas, Hidrogeologia Ambiental, Hidrologia e Qualidade da Água,



Instrumentos para a Gestão de Recursos Hídricos, Metodologia Científica, Poluição das Águas e Seminário I e II.

### 4.3 Crescimento do Sistema Elétrico Nacional

A Eletrobrás em 18/06/2021 publicou a Política de Gestão de Riscos das Empresas Eletrobrás, no sentido de estabelecer princípios, diretrizes e responsabilidades para a orientação dos processos de identificação, avaliação, tratamento, monitoramento e comunicação dos riscos inerentes às atividades das empresas Eletrobrás, incorporando a visão de riscos ao seu planejamento estratégico e à tomada de decisões (ELETROBRAS, 2021).

A partir da criação da Eletrobras, em 1961, a instalação de hidrelétricas no Brasil tomou maior impulso (PEREIRA, 2015). A figura 1 apresenta a capacidade instalada por fonte energética. Pode-se observar que a hídrica, representada pelos Aproveitamentos Hidroelétricos (AHEs) representam 59,9%, ou seja, 109,276 GW. As outras fontes de energia estão crescendo e representam 40,1%, ou seja, 65,091 GW, perfazendo um total de 174,367 GW de capacidade instalada (EPE, 2022).

Figura 1 - Capacidade instalada por fonte energética

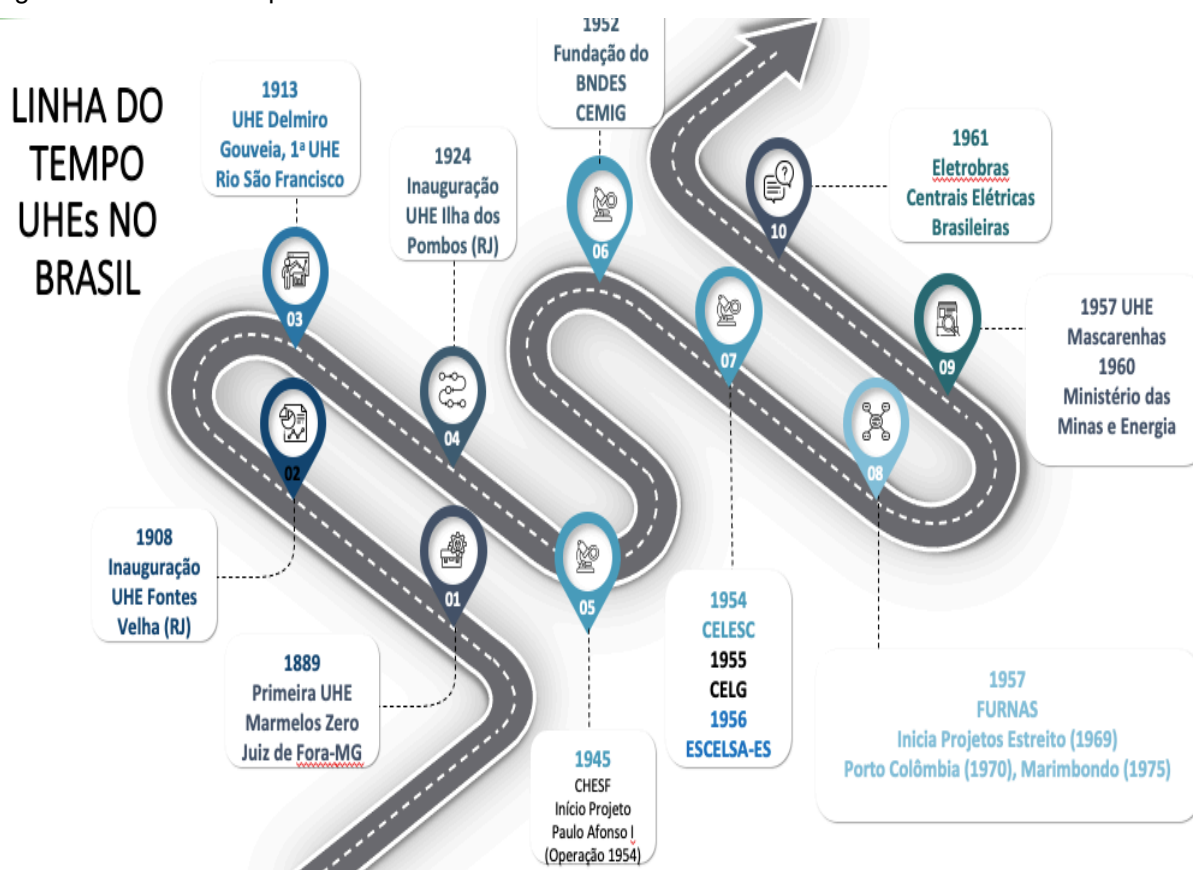


Fonte: EPE (2022).

Segundo a EPE (2022), a previsão é de inclusão de mais 4,5 GW ao parque hidroelétrico brasileiro até 2030. Existe ainda potencial para adicionar mais cerca de 11 GW de capacidade, somente com modernização de UHEs. A maior parte das UHEs situam-se nas bacias do Paraná e Atlântico Sudeste no Sudeste e Sul do Brasil, local onde estão instaladas as UHEs da Eletrobras Furnas. O parque hidroelétrico brasileiro é composto por 219 UHEs em operação, totalizando 109 GW de potência instalada.

A figura 2 apresenta a linha do tempo da implantação das UHEs no Brasil, desde 1889 até 1961.

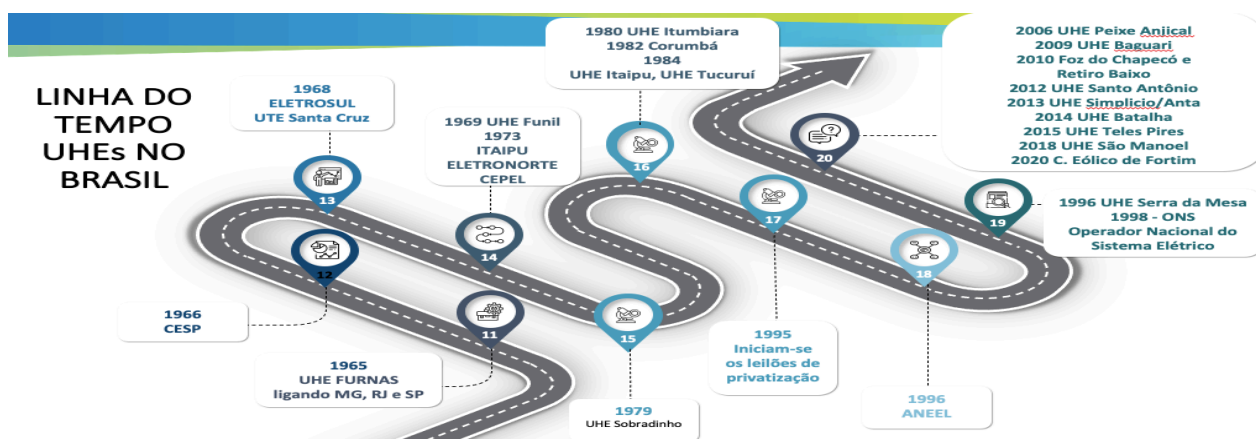
Figura 2 - Linha do tempo das UHEs no Brasil de 1889 até 1961



Fonte: Adaptado de Pereira (2015).

A figura 3 apresenta a linha do tempo da implantação das UHEs no Brasil, desde 1962 até 2020.

Figura 3 - Linha do tempo das UHEs no Brasil de 1962 até 2020



Fonte: Adaptado de Pereira (2015).

Pelas figuras 2 e 3, pode-se observar que após a criação da Eletrobras em 1961, houve um crescimento acelerado da construção de UHEs no Brasil.

#### 4.4 Mensuração dos Riscos

A norma internacional de gestão de riscos ISO IEC 31010 (ISO, 2019) definiu riscos como os efeitos de qualquer incerteza nos objetivos.

Riscos são mensurados pela sua probabilidade de ocorrência e impacto. Podem ser priorizados considerando o Valor Monetário Esperado (VME) ou simplesmente Valor Esperado (VE) que é calculado multiplicando-se a probabilidade do risco acontecer pelo impacto. Quanto maior o VE, maior a exposição ao risco. Quando o impacto não é financeiro, considera-se o Valor Esperado e quando o impacto é financeiro, considera-se o Valor Monetário Esperado.

Boholm (2018), “aponta que ao conceituar o risco como a probabilidade de um evento acontecer, aqueles eventos aos quais não seja possível atribuir probabilidade são excluídos da avaliação em detrimento de outros”.

Na Eletrobras Furnas, pratica-se o exercício de considerar um valor numérico para probabilidade e impacto dos riscos definidos, mesmo que seja difícil no início. Neste exercício, os riscos são definidos por uma equipe multidisciplinar, formada pelas áreas de comercialização de energia, de geração, transmissão, projetos, ambiental, fundiária, engenharia civil, mecânica e elétrica, dentre outras. Dessa

maneira, as subjetividades de escolhas pessoais são minimizadas no processo de gerenciamento de riscos.

Mensurar a probabilidade e impacto dos riscos é uma tratativa que deve ser realizada por profissionais de várias áreas com múltiplas experiências, a fim de tornar a modelagem de riscos o mais precisa ou perto da realidade possível. Corroborando com esta afirmativa, Aven (2018) argumenta que “a probabilidade deve considerar as incertezas, que requer conhecer a qualidade dos julgamentos que estão por trás da análise probabilística”.

Na Eletrobras Furnas, o autor desta pesquisa planejou e implementou modelos estocásticos para análise de riscos que consideram a incerteza na definição dos itens de custo formadores do Capex (*capital expenditure*) ou despesa de capital e a incerteza quanto à definição da probabilidade e impacto dos riscos, incluindo uma variabilidade do Capex e dos riscos. Estes modelos são definidos através de um *Brainstorming* entre a equipe e aplicados no modelo estocástico considerando a incerteza das definições. Com isso, o resultado dos modelos é mais preciso.

#### **4.5 Riscos e impactos**

Riscos são inerentes à atividade humana, podem ser categorizados em diversas configurações e terem diferentes naturezas, como estratégicos, organizacionais e operacionais. Os principais riscos que podem acontecer em barragens são galgamento, projeto, geotécnicos e estruturais. O quadro 1 fornece alguns exemplos de riscos que aconteceram no Brasil e no mundo que tiveram sérias consequências.

Quadro 1 - Exemplos de riscos

Organização	Risco	Consequências
Golfo do México British Petroleum (2010)	R1. Vazamento de óleo	Multa US\$ 20,8 bi, 11 mortos, impactos ambientais e econômicos (Documentado no Filme <i>Deepwater Horizon – Horizonte Profundo</i> ). Incêndio durou 87 dias, foi o pior acidente da indústria petrolífera dos EUA, mais de 210 milhões de litros de óleo vazaram no oceano
Brasil (São Paulo, 2014 e 2021)	R2. Crise Hídrica	Falta de água, desabastecimento de água, crise entre os Estados
Brasil - Petrobras (2014)	R3. Corrupção	Impacto de R\$ 88,6 bilhões
Alemanha- Volkswagen (2015)	R4. Gases poluentes	Impacto de US\$ 20 bilhões
Brasil-Samarco e Vale (2015)	R5. Desastre ambiental	Ruptura Barragem de Mariana 19 mortos, 11 toneladas de peixes mortos, Bento Rodrigues desapareceu, contaminou Rio Doce, Multa de R\$ 585 Milhões
Brasil-JBS (2017)	R6. Operação Carne Fraca	JBS Perda de R\$3,45 Bi e BRF com R\$2,31 Bi
Brasil-Vale (2019) Ruptura Barragem Brumadinho	R7. Desastre ambiental	Mais de 300 mortos, impacto Rio Paraopeba; Multa aplicada pelo MP à Vale de R\$ 37,6 bilhões; Perda de valor de mercado na BOVESPA de R\$ 71 Bilhões (ação caiu 24% em 1 dia e foi a maior queda histórica da bolsa). Vale foi retirada do Índice Dow Jones como empresa que mantém boas práticas para empresas investirem
Pandemia do Corona Vírus (2020/2022)	R8. Doença se alastrou pelo mundo	USA (US\$ 1,9 Trilhões para salvar população e a economia); Brasil (R\$ 620 Bilhões – PIB 2020 = - 4,1%) => Brasil retrocedeu economicamente a 2014; Mais de 5 milhões de pessoas mortas no mundo EUA (750 mil morreram); Mais de 600 mil pessoas morreram (Brasil)

Fonte: Adaptado de Pereira, 2015.

Verifica-se no quadro 1 que os riscos inerentes aos recursos hídricos foram os R1, R2, R5 e R7. Todos tiveram consequências muito graves, seja no impacto à vida das pessoas, ao meio ambiente ou econômicos.

As barragens são elementos construtivos implantados no curso dos rios e que tem a função principal de armazenar água. As barragens do setor elétrico são sempre construídas no curso dos rios e as barragens de mineração podem ou não estarem próximas à rios. O quadro 2 apresenta alguns riscos que aconteceram em barragens de mineração no Brasil e em outros países.

Quadro 2 - Exemplos de riscos de rompimento de barragens de mineração

Barragem	País (Ano de Rompimento)	Consequências
1.Barragem Marsa	Peru (1993)	Barragem de extração de ouro, 6 mortes
2.Barragem Merriespruit	África do Sul (1994)	Barragem de extração de ouro, 17 mortes
3.Barragem Placer	Filipinas (1995)	Barragem de extração de ouro, 12 mortes
4.Barragem Guangxi	China (2000)	Barragem de extração de ferro/cobre, 115 mortes
5.Barragem Macacos	Brasil (2001)	Barragem de extração de ferro, 5 mortes
6.Barragem Cataguases	Brasil (2003)	Barragem de rejeitos industriais, contaminou Rio Paraíba do Sul, mortandade de animais e desabastecimento de energia para uma população de mais de 600 mil pessoas
7.Barragem Shangluo	China (2006)	Barragem de extração de ouro, 17 mortes
8.Barragem Tooshi	China (2008)	Barragem de extração de ferro, 254 mortes
9.Barragem Kolontár	Hungria (2010)	Barragem de extração de bauxita, 10 mortes
10.Barragem Herculano (Itabirito, MG)	Brasil (2014)	Barragem de extração de ferro, 3 mortes
11.Mount Polley	Canadá (2014)	Lançamento de milhões de litros de lama e água contaminada no lago Polley
12.Barragem de Mariana (Samarco e Vale)	Brasil (2015)	19 mortos, 11 toneladas peixes mortos, Bento Rodrigues desapareceu, contaminou Rio Doce, Multa de R\$ 585 Milhões
13.Barragem Tonglvshan	China (2017)	Barragem de extração de cobre/ouro/prata/ferro, 3 mortes
14.Barragem Cieneguita	México (2018)	Barragem extração de ouro/prata, 7 mortes
15.Barragem Brumadinho (Vale)	Brasil (2019)	Mais de 300 mortos, impacto Rio Paraopeba; Multa aplicada pelo MP à Vale de R\$ 37,6 bilhões

Fonte: Adaptado de Pereira, 2015.

Dos exemplos do quadro 2, verifica-se que as rupturas 6, 11, 12 e 15 tiveram consequências muito graves nos respectivos recursos hídricos. O prejuízo nestes acidentes, são difíceis de calcular e embora as empresas causadoras tiveram multas astronômicas, o meio ambiente, a sociedade/comunidade e a economia sofreram enormes perdas que provavelmente, as multas não podem cobrir.

O quadro 3 apresenta alguns riscos de galgamento que aconteceram em barragens de geração de energia no Brasil e em outros países. O galgamento que é causado por excesso de chuvas no recurso hídrico durante um tempo prolongado e com muito volume, o que faz com que a água ultrapasse a crista da barragem, é geralmente um dos mais graves riscos que afetam as barragens e podem levar à ruptura.

Quadro 3 – Exemplos de riscos de galgamento que contribuíram para o rompimento de barragens de geração de energia (continua)

UHE Ano de Conclusão	Altura (m)	Causa ruptura-ano ruptura	Ação para mitigação (lições aprendidas)	Tempo de ruptura	Tipo de barragem	Número de Vítimas Fatais
1.Dale Dyke (Bradfield), Inglaterra 1864	29	1º Enchimento, Rachadura no aterro - 1864	Projetar o vertedouro para permitir a passagem da vazão de projeto	Desconhe cido	Terra	240
2.Iruhaike, Japão 1868	18	Galgamento - 1868	Majorar a vazão de projeto do vertedouro	Desconhe cido	Terra	1000
3.Mill River – EUA 1874	13	Falha Estrutural - 1874	Projeto ? Investigações ? Materiais ?	Desconhe cido	Terra	143
4.South Fork-EUA 1889	22	Falta de manutenção, Vertedouro projetado com 22m de largura diferente do projeto que era de 46m - 1889	Projetar o vertedouro para permitir a passagem da vazão de projeto	3 horas	Terra- Enrocamen to	2209
5.Walnut Grove- EUA, 1890	34	Galgamento - 1890	Majorar a vazão de projeto do vertedouro	Desconhe cido	Enrocamen to	150
6.Austin- EUA 1911	15	Falha Estrutural - 1911	Projeto ? / Investigações ? Materiais ?	Desconhe cido	Concreto Grav.	80
7.Euclides da Cunha e Armando Salles de Oliveira (Limoeiro)- Brasil-SP 1958/1960	56 e 35	Galgamento-1977 e 1985	Abertura das comportas	20 minutos	Terra	0

Fonte: Adaptado de C. Júnior 2011; Pereira 2017; 2020.

Quadro 3 – Exemplos de riscos de galgamento que contribuíram para o rompimento de barragens de geração de energia (continuação)

UHE Ano de Conclusão	Altura (m)	Causa ruptura-ano ruptura	Ação para mitigação (lições aprendidas)	Tempo de ruptura	Tipo de barragem	Número de Vítimas Fatais
8.Orós- Brasil-CE 1960	54	Galgamento - 1960	Elevação da crista	Poucas horas	Terra- Enroc.	600 mil desabriga- dos, 1.000
9.Vanjont – Itália 1960	261	Galgamento-1963	Majorar a vazão de projeto do vertedouro	Desconhe- cido	Concreto- Arco	2600
10.El Guapo – Venezuela, 1978	60	Galgamento-1999	Majorar a vazão de projeto do vertedouro	Desconhe- cido	Terra	Desco- nhecido
11.Banqiao & Shimantan – China 1952	24,5	Planejado somente 5 comportas (projeto original eram 10) - 1975	Construir e projetar o número correto de comportas para atender à vazão de projeto	Desconhe- cido	Terra	26.000
12.Machhu- Índia 1972	26	Falta de capacidade do vertedouro 1979	Majorar a vazão de projeto do vertedouro	2 horas	Terra/Alve- naria	1300
13.Glashutt e- Alemanha, 1953	8,7	Falta de cap. do vertedouro - 2002	Majorar a vazão de projeto do vertedouro	Desconhe- cido	Terra	0
14.Canyon Lake – EUA, 1938	6	Falta de cap. do vertedouro - 1972	Majorar a vazão de projeto do vertedouro	Desconhe- cido	Terra	242
15.Panshet e Khadakwas la-índia 1961 e 1879	51 e 40	Falta de cap. do vertedouro - 1961	Projetar vertedouro com comportas	2 horas	Terra/Alve- naria	1000
16.Frías- Argentina 1940	15	Projeto inadequado (1,0V:1,0H) Manutenção insuficiente, Sedimentos depositados no reservatório reduziram o volume útil e bloquearam 2 das 5 aberturas da torre de descarga - 1970	Projeto de reconstrução: Talude montante 1,0V:3,5H e jusante 1,0V:2,5H; Vertedouro concebido para 390 m <sup>3</sup> /s (10 vezes maior que o original e tempo de recorrência 1000 anos) => Cheia ocorre 1 vez ou é ultrapassada 1 vez a cada 1000 anos	15 minutos	Enrocamen- to	102

Fonte: Adaptado de C. Júnior (2011); Pereira (2017; 2020).



Quadro 3 – Exemplos de riscos de galgamento que contribuíram para o rompimento de barragens de geração de energia (conclusão)

UHE Ano de Conclusão	Altura (m)	Causa ruptura-ano ruptura	Ação para mitigação (lições aprendidas)	Tempo de ruptura	Tipo de barragem	Número de Vítimas Fatais
17.Lower Otay – EUA, 1897	37	???	Majorar a vazão de projeto do vertedouro	20 minutos	Enrocamen to	30
18.Laurel Run – EUA 1919	42	Pico da cheia 1600m <sup>3</sup> /s e tempo de recorrência entre 5000 e 10000 anos (Falta de capacidade do vertedouro) 1977	Projetar o vertedouro para permitir a passagem da vazão de projeto	Poucas horas	Terra	70

Fonte: Adaptado de C. Júnior (2011); Pereira (2017; 2020).

Verifica-se pelo quadro 3 que ao longo dos anos, aconteceram inúmeras rupturas de barragens de geração de energia por galgamento. Percebe-se que das 18 rupturas, 14 (2, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17 e 18) estão relacionadas diretamente com o galgamento que é causado, principalmente, pelo aumento do volume dos rios, devido às grandes precipitações. A falta de capacidade do vertedouro para verter o volume de água é também um risco que pode ocasionar o galgamento e por isso, foi incluído nos 14 riscos. Percebe-se que o tempo de ruptura geralmente depende do tipo de barragem, mas em geral, vai de poucos minutos até algumas horas. As rupturas podem acontecer em barragens de qualquer altura e de qualquer tipo como terra, enrocamento ou concreto. O número de vítimas fatais depende muito da quantidade de população a jusante da barragem e do nível de automatização da comunicação e alerta existentes na UHE.

É importante ressaltar que pela legislação brasileira de segurança de barragens (Lei 14.066:2020), passou a ser obrigatório sistema automatizado de comunicação e alerta. Observa-se também que a maioria dos riscos levantados no quadro 3, as mitigações são projetar o vertedouro para permitir a passagem da vazão de projeto e construir e projetar o número correto de comportas para atender à vazão de projeto que são mitigações preventivas para reduzir a probabilidade de acontecer o risco do galgamento.

O quadro 4 apresenta alguns riscos geotécnicos que aconteceram em barragens de geração de energia no Brasil e em outros países. Riscos geotécnicos são um dos mais importantes e podem levar a barragem à ruptura, podendo incluir recalques da fundação, deficiência de projetos, *piping*, rochas fracas ou difíceis de

serem tratadas, materiais empregados na fundação, dentre outros. Os exemplos apresentados no quadro 4 ocorreram no Brasil, Estados Unidos, Índia e França, mas evidentemente já ocorreram em outros países.

Quadro 4 - Exemplos de riscos geotécnicos que contribuíram para o rompimento de barragens de geração de energia (continua)

UHE Ano de Conclusão	Altura (m)	Causa ruptura-ano ruptura (Primeiros 10 anos de vida)	Ação para mitigação (lições aprendidas)	Tempo de Ruptura	Tipo de barragem	Número de Vítimas Fatais
1.Pampulha- Brasil-MG 1943	16,5	Recalques da fundação -Comporta emperrada (falta de manutenção), Piping - 1954	Abertura da comporta, rebaixamento do reservatório (o fluxo d'água no sistema de drenagem era visível e aumentou)	5 dias	Terra	0
2.Teton-EUA 1975	93	Projeto deficiente- Rochas vulcânicas altamente permeáveis e fraturadas-Rocha não foi adequadamente impermeabilizada- Erosão Interna ( <i>piping</i> ) - 1976	A estrutura do vertedouro estava incompleta e não pode ser aberta para rebaixar o reservatório quando a percolação foi observada	Algumas horas	Terra	11
3.Fontenelle- EUA 1964	39,6	Erro de projeto-material da fundação-Injeções não foram suficientes para selar as fraturas da fundação-Surgência a jusante não considerada-Piping - 1965	Injeção para selar as fraturas da fundação	Todo o processo desde a primeira observação da percolação, foram cerca de 120 dias	Terra	0
4.Nanaksaga r-Índia 1962	16	Piping-reservatório não foi rebaixado antes da ruptura da barragem pois os responsáveis ficaram relutantes em tomar esta decisão por conta de inundação a jusante - 1967	Filtros, rebaixamento do reservatório	2 horas	Terra	100

Fonte: Adaptado de Pereira (2020).

Quadro 4 – Exemplos de riscos geotécnicos que contribuíram para o rompimento de barragens de geração de energia (conclusão)

UHE Ano de Conclusão	Altura (m)	Causa ruptura-ano ruptura (Primeiros 10 anos de vida)	Ação para mitigação (lições aprendidas)	Tempo de Ruptura	Tipo de barragem	Número de Vítimas Fatais
5.Malpasset- França 1954	65	Investigações limitadas devido a falta de recursos, Fissuras observadas na base da barragem não foram investigadas, deformação da fundação, projeto não previu nenhum dispositivo de drenagem da fundação porque o projetista considerava que a subpressão não teria qualquer consequência na estabilidade da barragem - 1959	Projeto mais eficiente, pois a barragem foi construída em cima de 2 acidentes geológicos	2 semanas após a identificação das fissuras a barragem rompeu	Concreto em arco	421
6.St. Francis – EUA 1926	62,5	Ruptura durante o enchimento, Rochas fracas e difíceis de serem tratadas, 1928	Tratamento da fundação	1 semana após o enchimento	Concreto gravidade	450
7.Walter Bouldin – EUA 1967	54	Fraqueza da fundação; fraqueza do aterro causada pelo deslizamento, taludes muito inclinados, aterro mal compactado-Piping - 1975	Projeto mais eficiente	Desconhecido	Terra	0
8.Camará– Brasil-PB 2002	50	Falha de projeto (deslizamento de blocos de rocha de uma junta falha), 2004	A anomalia deveria ter sido removida para permitir apoiar a barragem no maciço rochoso de boa qualidade	Desconhecido	CCR	4
9.Big Bay – EUA 1991	17,4	Materiais da fundação altamente erodíveis, barragem não tinha elemento de drenagem interna, Piping-2004	Projeto mais eficiente	Desconhecido	Terra	0
10.Hadlock – EUA 2005	9	2005 – Corte Estadual deu a sentença 12 anos depois: construtora considerada responsável por 45% do acidente; empresa projetista com 27%; cidade de Fort Ann com 23%; laboratório que testou os materiais de construção com 5%	Projeto mais eficiente, construção adequada; materiais testados com maior rigor, etc.	Desconhecido	Terra	0

Fonte: Adaptado de Pereira (2020).

Verifica-se pelo quadro 4 que ao longo dos anos, aconteceram inúmeras rupturas de barragens de geração de energia por riscos geotécnicos. Percebe-se que as causas das rupturas foram as mais variadas (1 => Falta de manutenção acarretando emperramento da comporta; 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 => Projeto deficiente de impermeabilização, injeções, drenagem, tratamento das rochas, membrana de revestimento, aterro mal compactado; 4 => *Piping*). Assim como nos riscos de galgamento, percebe-se que o tempo de ruptura geralmente depende do tipo de barragem, mas em geral, vai de poucas horas até alguns dias ou semanas, com exceção do rompimento 3 que levou cerca de 120 dias. As rupturas podem acontecer em barragens de qualquer altura e de qualquer tipo como terra, enrocamento, concreto convencional ou concreto compactado com rolo (CCR).

Observa-se também que na maioria dos riscos levantados no quadro 4, as mitigações são projeto e execução do vertedouro adequado (2), injeção de concreto (3), filtros, projeto mais eficiente considerando os acidentes geológicos (5, 7, 8, 9 e 10), tratamento da fundação (6), que são mitigações preventivas para reduzir a probabilidade de acontecer o risco geotécnico. As mitigações “abertura das comportas (1), rebaixamento do reservatório (1 e 4)” são mitigações corretivas para reduzir o impacto do risco.

O quadro 5 apresenta alguns riscos que levaram a rupturas por colapsos estruturais que aconteceram em barragens de geração de energia no Brasil e em outros países.

Quadro 5 - Exemplos de riscos de colapsos estruturais que contribuíram para o rompimento de barragens de geração de energia (continua)

UHE Ano de Conclusão	Altura (m)	Causa ruptura-ano ruptura	Ação para mitigação (lições aprendidas)	Tempo de ruptura	Tipo de barragem	Número de Vítimas Fatais
1.Espora- Brasil-GO 2006	45	Percolação nas interfaces fundação/estrutura do barramento/vertedouro 2008	Projeto mais eficiente	3 meses	Terra	0

Fonte: Adaptado de Pereira (2020); Brito, (2011); Grupo Banco Mundial (2012).

Quadro 5 - Exemplos de riscos de colapsos estruturais que contribuíram para o rompimento de barragens de geração de energia (continuação)

UHE Ano de Conclusão	Altura (m)	Causa ruptura-ano ruptura	Ação para mitigação (lições aprendidas)	Tempo de ruptura	Tipo de barra-gem	Número de Vítimas Fatais
2.Apertadinho-Brasil-RO 2006	40	<i>Piping</i> na fundação e erosão, Projeto inadequado para as fundações, local era muito permeável; cavidade no local do vertedouro foi preenchida com blocos de rocha, Rompeu no 1º enchimento, 2008	O material permeável da fundação deveria ter sido removido e as estruturas apoiadas em rocha são e estas estruturas precisariam ter mais peso, sistema de drenagem implantado	Desconhecido	Terra	0
3. Veja de Tera-Espanha 1957	34	Durante a construção, os trabalhos eram suspensos no inverno, resultando em juntas de baixa qualidade entre o concreto velho e o novo (prática construtiva deficiente), a ruptura começou numa junta entre a alvenaria e o contraforte, 1959	Não interromper o andamento da construção por causa do clima	Desconhecido	Contrafortes	144

Fonte: Adaptado de Pereira (2020); Brito, (2011); Grupo Banco Mundial (2012).

Quadro 5 - Exemplos de riscos de colapsos estruturais que contribuíram para o rompimento de barragens de geração de energia (continuação)

UHE Ano de Conclusão	Altura (m)	Causa ruptura-ano ruptura	Ação para mitigação (lições aprendidas)	Tempo de ruptura	Tipo de barragem	Número de Vítimas Fatais
4.Alla Sella Zerbino- Itália 1923	42	Pressão d'água por causa de chuvas intensas, erosão extensiva do maciço rochoso, um xisto, atestou sua baixa qualidade, 1935	Foi executado um programa de injeções para melhorar as condições da fundação, mas não previram no projeto salvaguardas contra erosão. Falta de dispositivo de dissipação de energia. O pé da barragem foi minado pelos elevados vertimentos os quais precipitaram o deslizamento das estruturas de gravidade do barramento	Desconhecido	Concreto Gravidade	100
5.Gleno- Itália 1923	16	Estrutura submetida a altas tensões de cisalhamento, rompeu 30 dias após o enchimento pela chuva excepcional, onda de cheia atingiu 30m de altura	Projeto do vertedouro subdimensionado (para barragens < 30m ou com reservatório < 50 milhões m <sup>3</sup> , e não havendo risco de perda de vidas, a vazão de projeto deve respeitar a recorrência mínima de 1000 anos)	Subi-tamente	Concreto Arco	600
6.Bouzey- França 1881	22	Logo após o início da construção decidiu-se aumentar a altura da barragem em 2 m, sem alterar as outras dimensões, iniciou-se um processo de infiltração logo após o enchimento do reservatório, descobriu-se trincas na barragem, deflexões da crista da ordem de 2,5 cm	O nível máximo operacional do reservatório foi abaixado, mas mesmo com a infiltração e as trincas, nenhuma providência imediata foi tomada, trincas foram injetadas, a base da barragem foi estendida e o talude foi suavizado, foram instalados drenos, em vez de usar cimento e areia limpa como estava definido no contrato, os construtores misturaram cal com areia suja de baixa qualidade	Subi-tamente	Alvenaria	150

Fonte: Adaptado de Pereira (2020); Brito, (2011); Grupo Banco Mundial (2012).

Quadro 5 – Exemplos de riscos de colapsos estruturais que contribuíram para o rompimento de barragens de geração de energia (conclusão)

UHE Ano de Conclu- são	Altura (m)	Causa ruptura-ano ruptura	Ação para mitigação (lições aprendidas)	Tem po de ruptu ra	Tipo de barra gem	Número de Vítimas Fatais
7.Oro- ville- EUA 1967	Mais alta USA = 235m	Após anos de seca ocorreu uma vazão de 2800 m <sup>3</sup> /s, pelo vertedouro passavam 1400 m <sup>3</sup> /s, iniciou processo de erosão do vertedouro, o qual foi fechado para recuperação, o NA do reservatório subiu e o vertedouro de emergência entrou em operação pela primeira vez em 50 anos, 2017	Tomou-se a decisão de evacuar 200 mil habitantes e de retomar a operação do vertedouro de serviço que embora danificado era necessário para rebaixar o reservatório, o escoamento em alta velocidade pode ter comprometido alguma irregularidade de junta ou trinca que apareceu na laje do vertedouro e provocado o início do processo erosivo por cavitação – MITIGAÇÃO: Para os trechos mais vulneráveis das superfícies, utiliza-se materiais mais resistentes, como, concretos especiais, a alternativa frequentemente mais adequada e mais econômica é a aeração da veia líquida; Remoção de irregularidades na superfície do concreto; Revestimento de aço; Aumento da resistência do concreto com polímeros e resinas epóxi e concretos com fibras; Indução de escoamento combinado de ar e água	Des- co- nheci do	Ater- ro	200 mil pessoas evacua- das

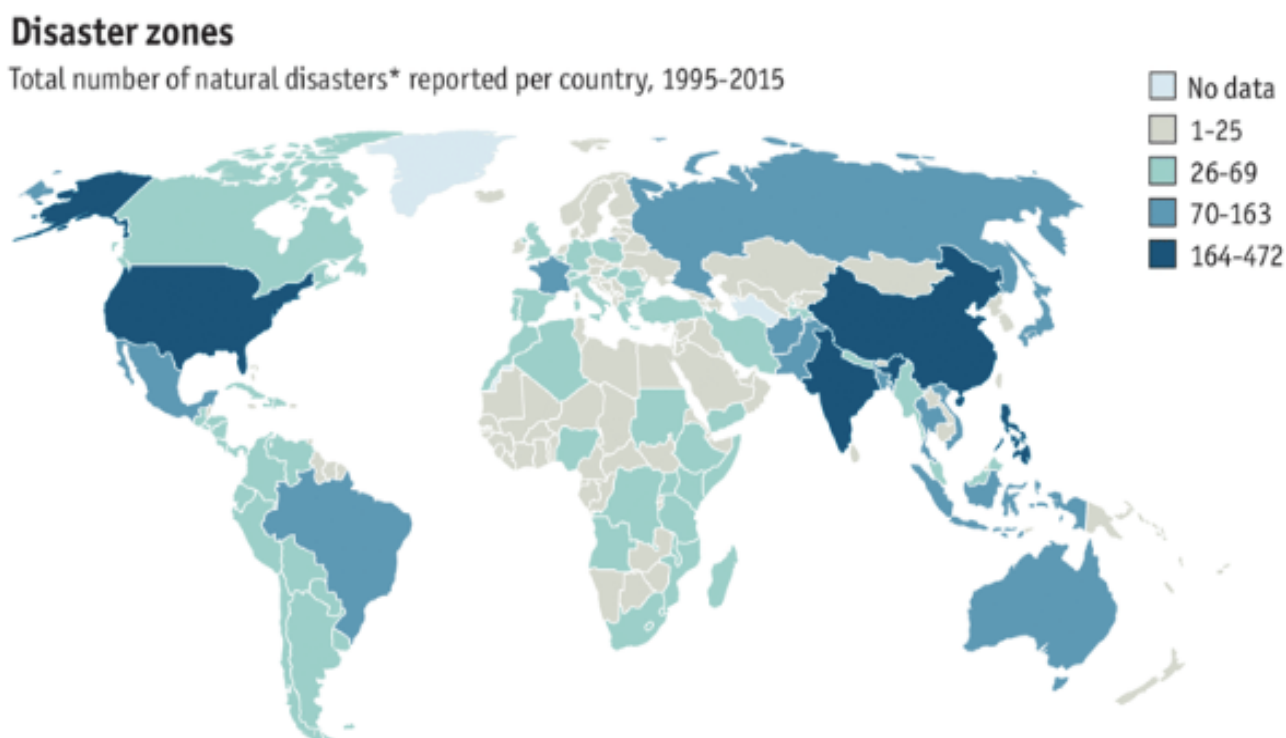
Fonte: Adaptado de Pereira (2020); Brito, (2011); Grupo Banco Mundial (2012).

Verifica-se pelo quadro 5 que ao longo dos anos, aconteceram inúmeras rupturas de barragens de geração de energia por colapsos estruturais. Percebe-se que as causas das rupturas foram as mais variadas (1 => Percolação pela fundação/vertedouro; 2, 4 e 6 => Projeto inadequado de fundação; 3 => Erro de execução; 5 e 7 => Galgamento). Assim como nos riscos de galgamento e geotécnicos, percebe-se que o tempo de ruptura geralmente depende do tipo de barragem, mas em geral, vai de minutos até alguns meses. As rupturas podem acontecer em barragens de qualquer altura e de qualquer tipo. Observa-se também que a maioria dos riscos levantados no quadro 5, as mitigações são projeto geotécnico e execução adequados (1, 2, 3, 4); Projeto do vertedouro adequado (5) que são mitigações preventivas para reduzir a probabilidade de acontecer o risco de

colapsos estruturais. A mitigação “rebaixamento do reservatório e instalação de drenos (6 e 7)” são mitigações corretivas para reduzir o impacto do risco.

A figura 4 apresenta as regiões do planeta pelo número total de desastres naturais relatados por país de 1995 a 2015.

Figura 4 - Número de desastres naturais por região de 1995 a 2015



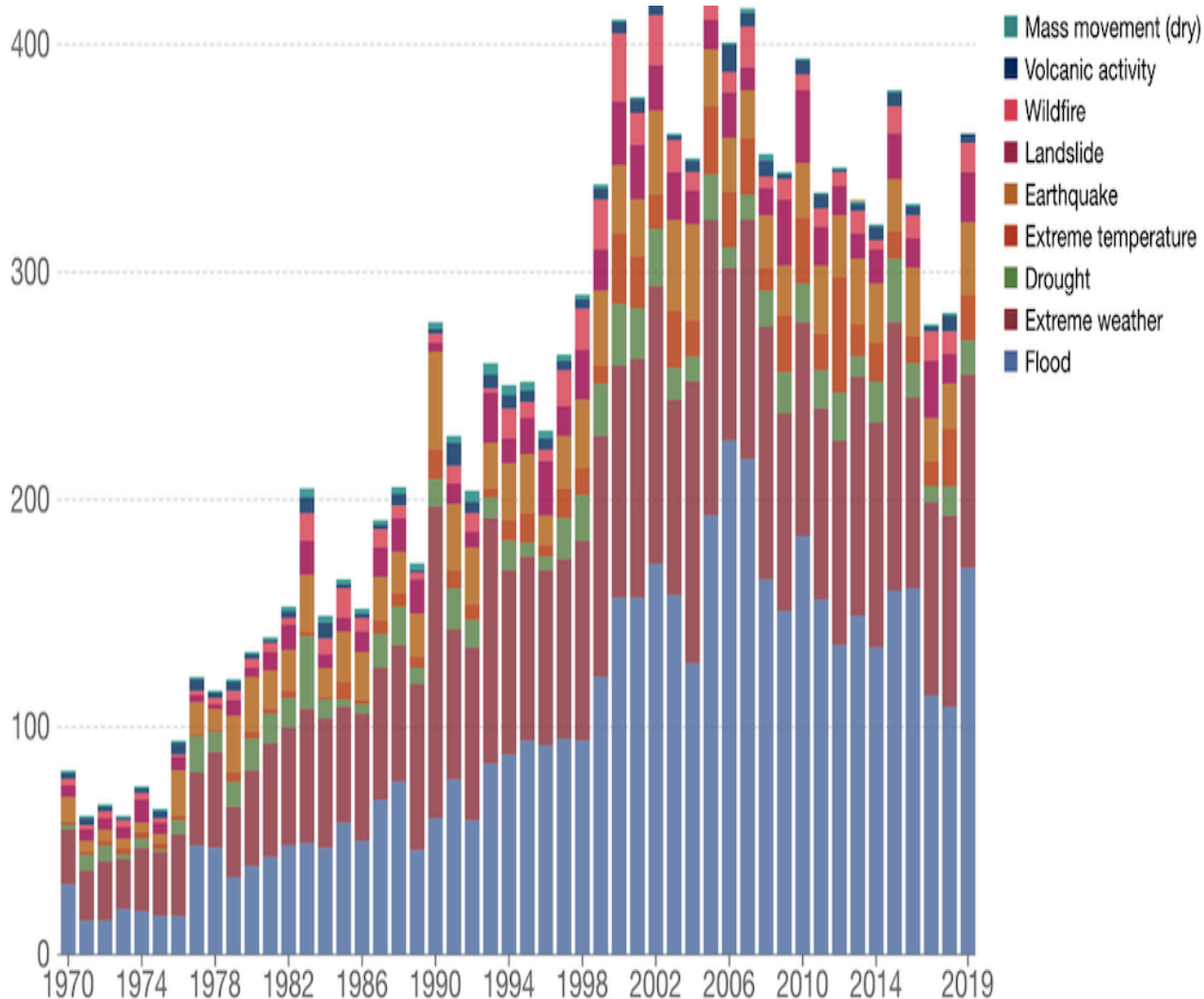
Fonte: Economist.com (2017).

Verifica-se pela figura 4 que nas duas décadas de 1995 a 2015, os Estados Unidos/Alasca e parte da Ásia tiveram os maiores desastres naturais (164 a 472), o Brasil, México, parte da Europa e Ásia ficaram em segundo lugar com 70 a 163 desastres, Parte da África, Oriente Médio e Europa ficaram em terceiro lugar com 26 a 69 e em quarto lugar ficou parte da África, Ásia e Europa, de 1 a 25.

A figura 5 apresenta a ocorrência de desastres naturais por tipo relatados de 1970 a 2019. Os desastres incluem aqueles relacionados ao clima e a outros eventos.



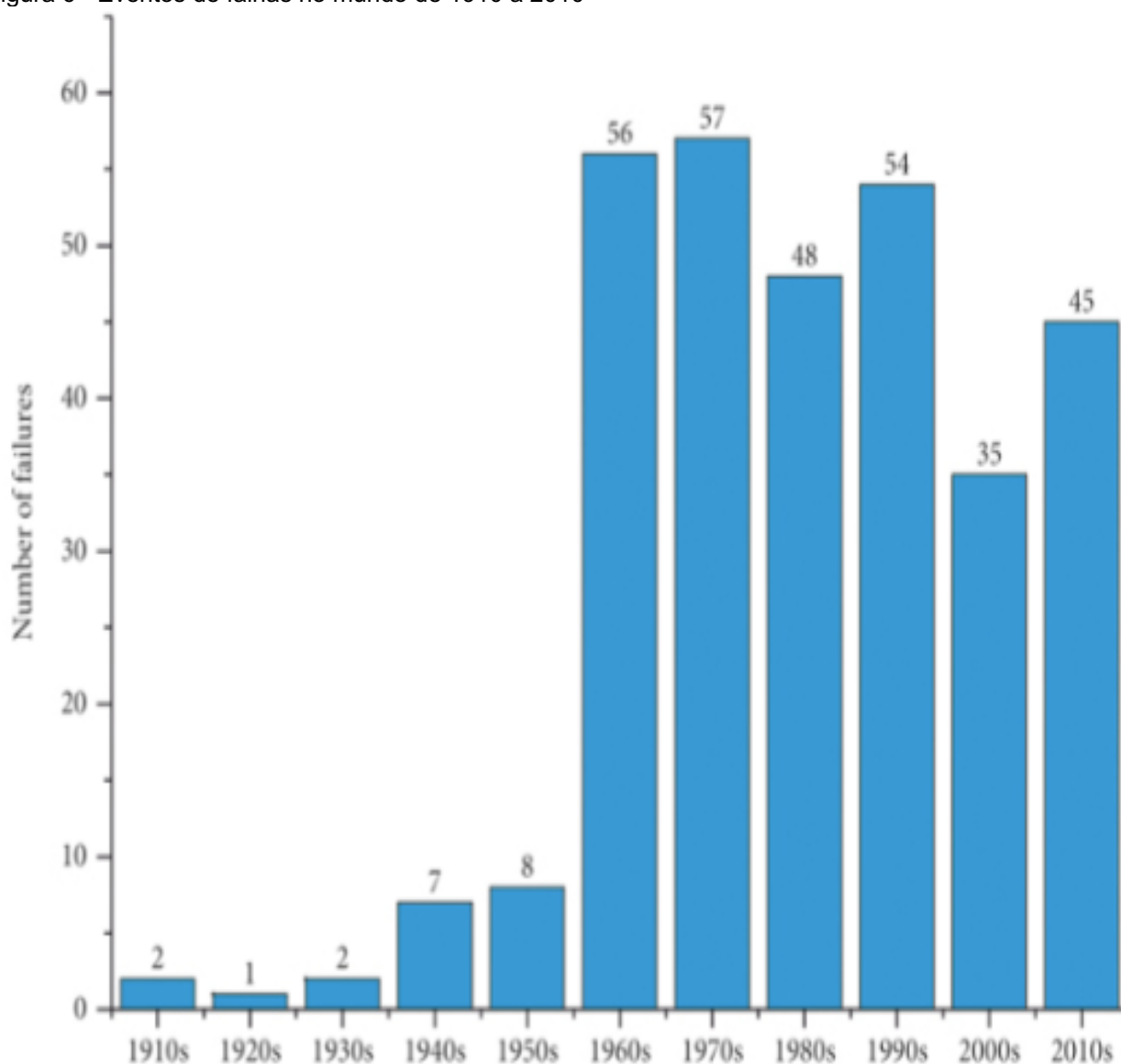
Figura 5 – Número de desastres naturais por tipo de 1995 a 2015



Fonte: Our World in Data (2020).

Os principais processos perigosos listados foram enchentes, clima extremo, seca, temperatura extrema, terremoto, deslizamento de terra, incêndios, atividade vulcânica e movimento de massa. A figura 6 apresenta outra estatística representada como eventos de falhas no mundo ao longo dos anos.

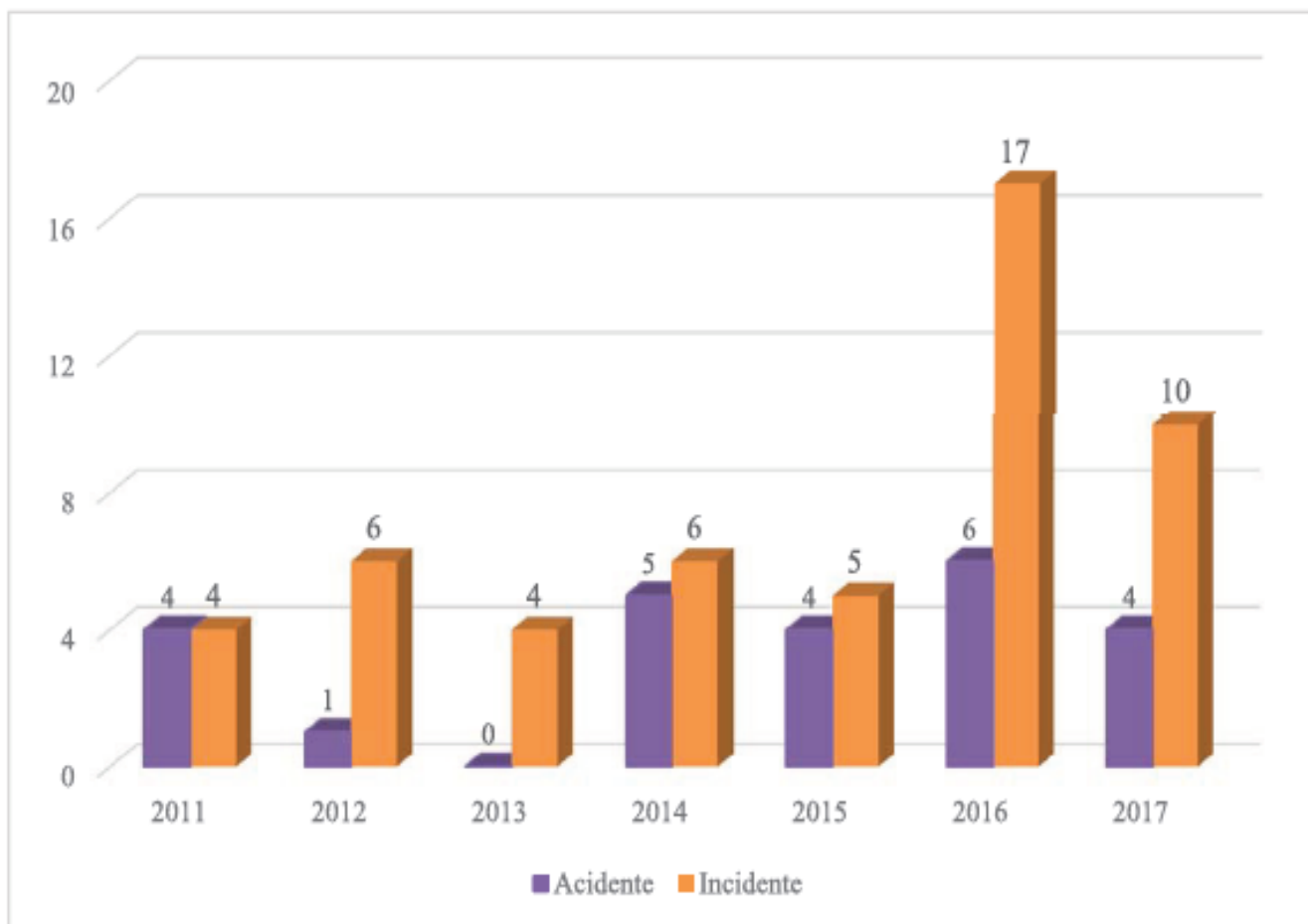
Figura 6 - Eventos de falhas no mundo de 1910 a 2010



Fonte: Lyu *et al.* (2019).

A figura 7 apresenta outra estatística de falhas no Brasil de 2011 até 2017, mostrando o número de acidentes que são rupturas mais severas e incidentes que são pequenos problemas mais leves que não necessariamente levaram ao colapso da barragem.

Figura 7 - Evolução do número de acidentes e incidentes no Brasil



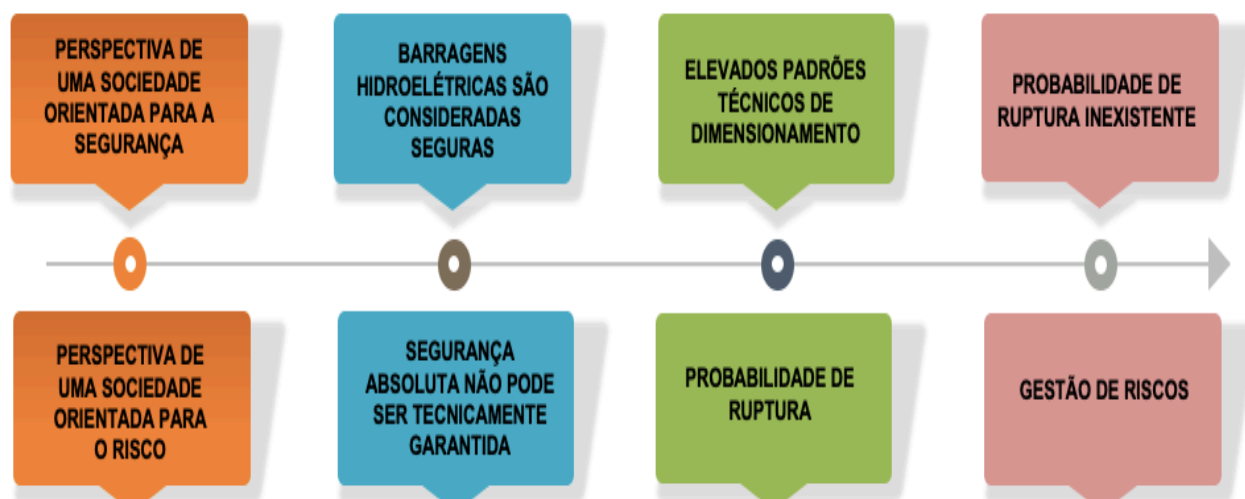
Fonte: Lyu *et al.* (2019).

Por todos estes exemplos de riscos citados e os desastres naturais que podem ocorrer, é importante que os recursos hídricos sejam gerenciados de maneira preventiva e que as entidades que têm a responsabilidade de gerenciá-los, tanto a nível qualitativo quanto quantitativo, tenham realmente noção dos perigos que estes recursos hídricos estão submetidos e que possam fazer uma gestão de risco eficiente em prol da sociedade e do país, porque a água, ao contrário do que alguns possam acreditar, é um recurso finito e como tal, deve ser cuidadosamente gerenciada.

Deste modo, é importante fazer a distinção entre uma sociedade orientada para a segurança e a orientada para o risco. Segundo Rettmeier *et al.* (2001), a sociedade orientada para a segurança considera que as barragens hidroelétricas são consideradas seguras com elevados padrões técnicos de dimensionamento e a probabilidade de ruptura inexistente. Já a sociedade orientada para o risco, acredita

que segurança absoluta não pode ser tecnicamente garantida, existe a probabilidade de ruptura por menor que seja e pratica a gestão proativa de riscos (figura 8).

Figura 8 - Perspectivas de uma sociedade orientada a segurança e ao risco



Fonte: Adaptado de Rettemeier *et al.* (2001).

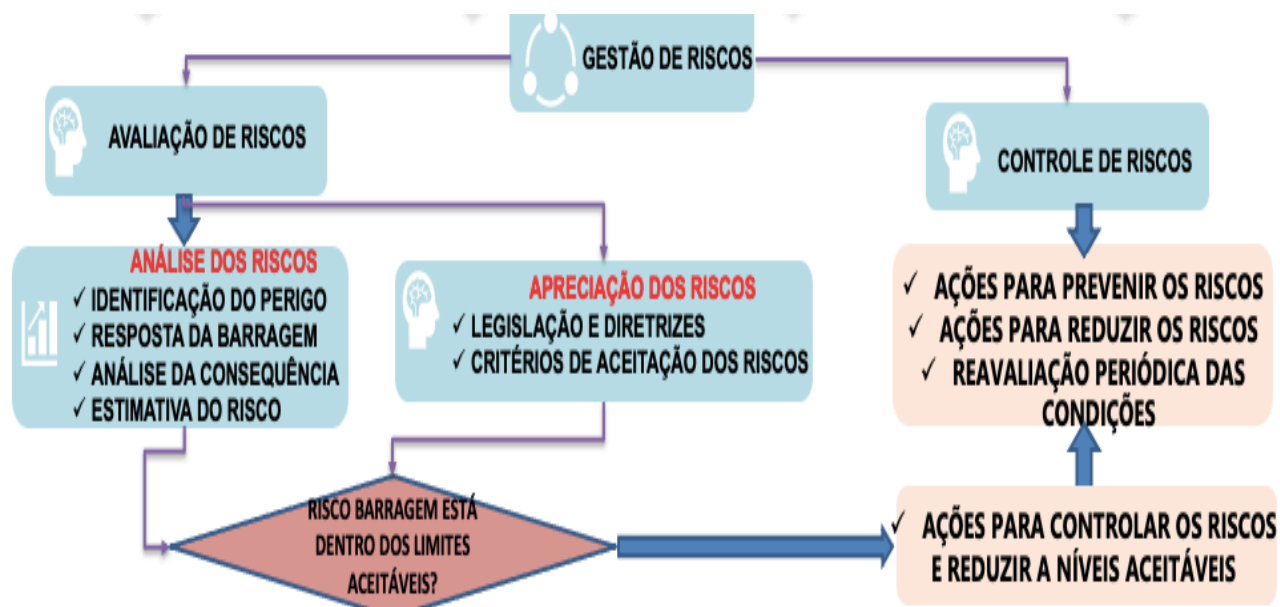
#### 4.6 Frameworks: Segurança de Barragens, ISO31000, COSO e Cemaden

*Frameworks* são gráficos ou desenhos de diversas naturezas que possuem o objetivo de apresentar um fenômeno graficamente e facilitar o entendimento dos diversos tipos de riscos, seus conceitos, causas, consequências e estratégias de tratamento. Nesta dissertação, os *frameworks* serão utilizados para reunir e resumir em um único gráfico, as principais informações dos riscos descritos.

O primeiro *framework* a ser apresentado foi elaborado por Kreuzer (2000). Este *framework* é utilizado para gestão de riscos de barragens e é dividido em avaliação de riscos e controle de riscos. A avaliação de riscos divide-se em análise dos riscos e apreciação dos riscos. A análise é realizada através da identificação do perigo, resposta da barragem, análise da consequência e estimativa do risco. A apreciação dos riscos é a verificação da legislação, diretrizes organizacionais, do ramo de negócio que pertence a organização e da definição dos critérios de aceitação dos riscos, também conhecido como apetite aos riscos. A etapa de controle dos riscos contém as ações para prevenir e reduzir os riscos, além da

reavaliação periódica das condições que podem gerar riscos. A figura 9 apresenta o *framework* desenvolvido por Kreuzer.

Figura 9 - Framework para gestão de riscos de barragens



Fonte: Adaptado de Kreuzer (2000).

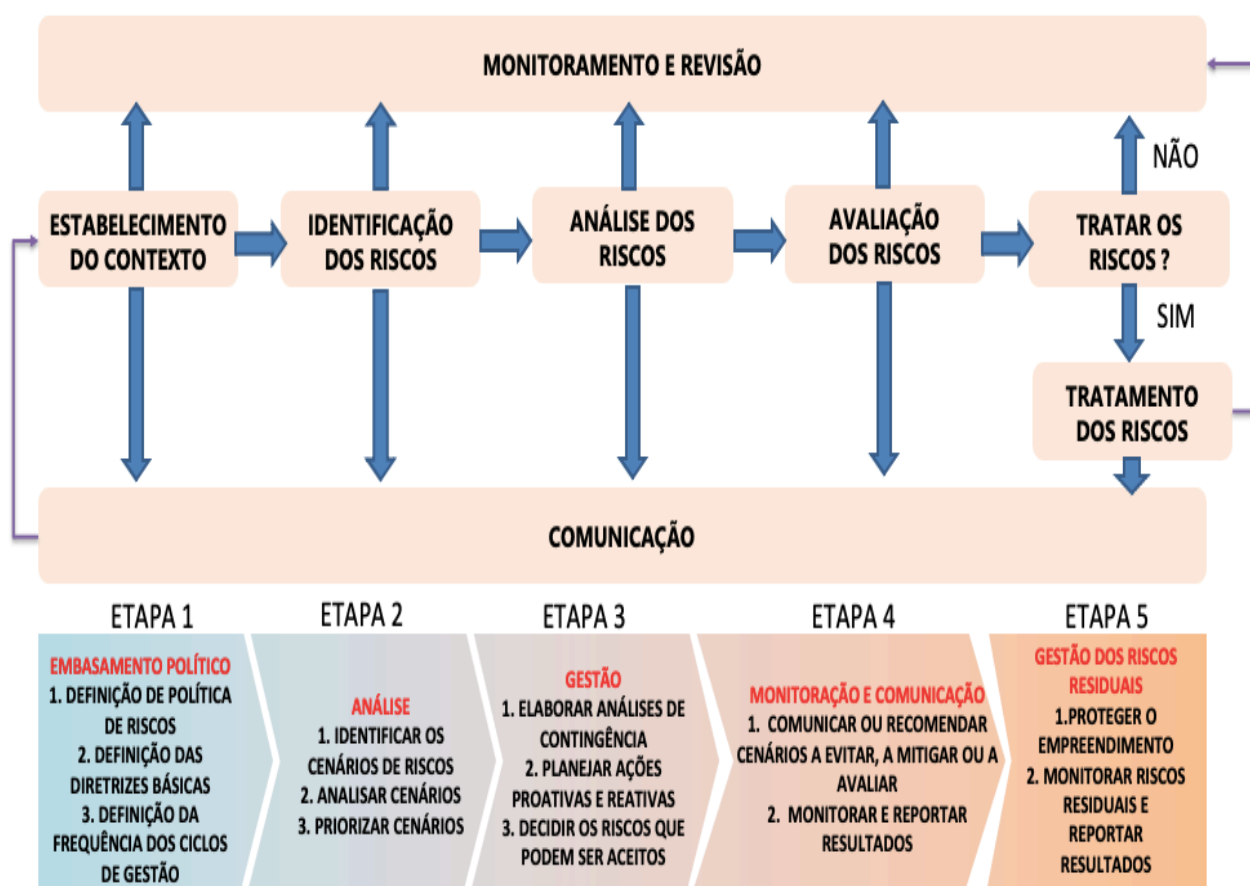
O segundo *framework* é proposto pela norma internacional de gestão de riscos ISO IEC 31010 (ISO, 2019), que estabeleceu um *framework* para gestão de riscos de qualquer natureza, com suas etapas. A norma brasileira correspondente é a ABNT NBR ISO 31000:2018. As incertezas podem levar para consequências positivas ou negativas. Segundo a norma, incerteza é um termo que inclui muitos conceitos que continuam a ser desenvolvidos pois ainda não existe uma definição amplamente aceita. Alguns exemplos de incertezas são assumir que as premissas são verdadeiras, a variabilidade nos parâmetros de decisão, a validade ou acurácia dos modelos que geram curvas de tendência do futuro, dentre outros.

As consequências positivas são os ganhos, também chamados de oportunidades e as negativas são as perdas, também chamadas de ameaças. Como exemplos de consequências positivas ou negativas pode-se citar: redução/aumento de custo, aumento/redução da produtividade, melhoria/redução da qualidade, entrega no prazo/perda de prazo, dentre outras.

O *framework* de gestão de riscos da ABNT NBR ISO 31000:2018 possui basicamente cinco etapas (figura 10). A primeira é o estabelecimento do contexto com a definição da política de riscos, das diretrizes básicas e da frequência dos

ciclos de gestão. A segunda etapa é a identificação dos riscos pela identificação dos cenários de riscos, análise e priorização dos cenários. A terceira etapa é a análise dos riscos através da definição de contingência, planejamento de ações proativas e reativas e da decisão dos riscos que podem ser aceitos. A quarta etapa é a monitoração e comunicação que inclui a recomendação de cenários a evitar, mitigar ou avaliar e o monitoramento e emissão de relatórios de resultados. A quinta etapa é a gestão dos riscos residuais que inclui a proteção do empreendimento ou recurso hídrico, o monitoramento dos riscos residuais e a emissão dos relatórios de resultados.

Figura 10 - Framework para gestão de riscos organizacionais

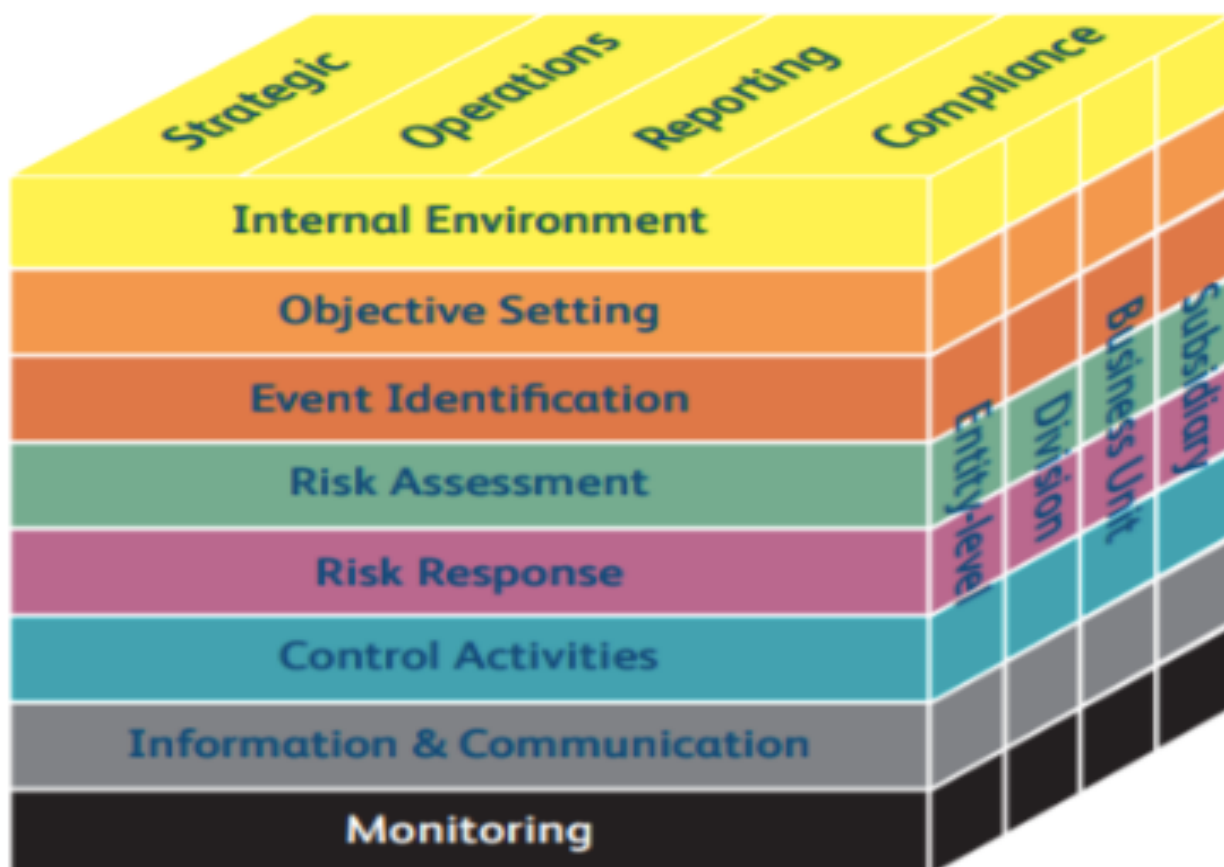


Fonte: Adaptado de ISO IEC 31010 (2019), *apud* Assis *et al.* (2019).

O terceiro *framework* considerado importante e muito utilizado pelas organizações em todo o mundo, é o definido pelo *Committee of Sponsoring of the Treadway Commission* (COSO, 2017), que publicou o *Enterprise Risk Management – Integrated Framework* (COSO II – ERM), sendo utilizado como referência em

gestão de riscos corporativos. O cubo do COSO II – ERM está apresentado na figura 11.

Figura 11 - Cubo do COSO II – ERM



Fonte: ERM Insights (2022).

O cubo do COSO II – ERM possui três pilares: Nível organizacional, Nível de processos e Nível de Alinhamento.

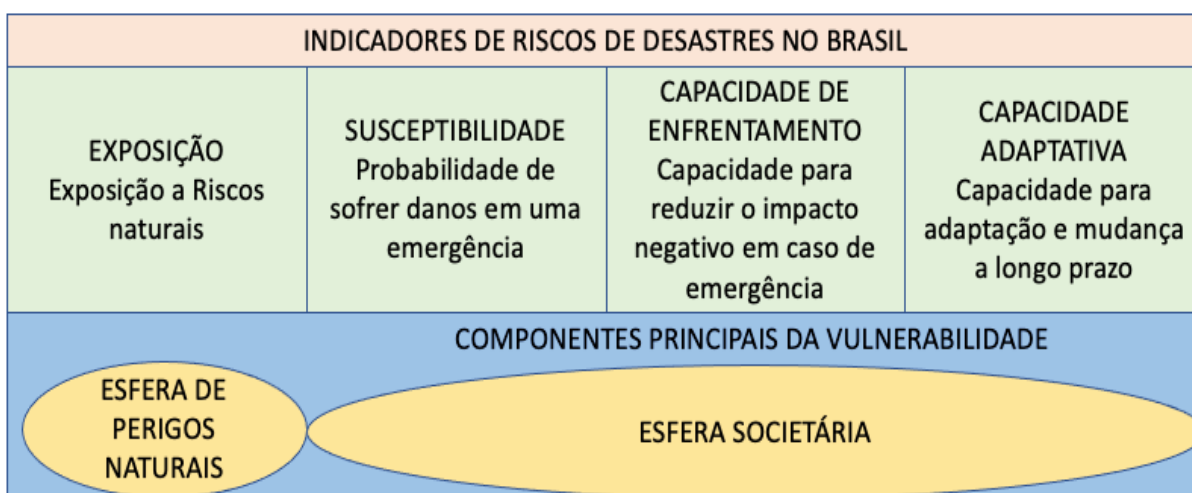
O nível organizacional contém quatro subníveis: Subsidiária, unidade de negócios, divisão e entidade. O nível de processos contém oito subníveis: Ambiente interno, estabelecimento dos objetivos, avaliação de riscos, respostas aos riscos, atividades de controle, informação/comunicação, monitoramento. O nível de alinhamento contém quatro subníveis: Estratégico, operações, relatórios de indicadores e alinhamento.

Os dois *frameworks* da ISO 31010 e COSO II-ERM possuem a preocupação de segmentar o gerenciamento de riscos em etapas que basicamente são semelhantes: definir o contexto (qual escopo e objetivo), identificar riscos (que

podem afetar os objetivos), análise (priorizar os riscos), tratamento (preventivo ou corretivo), comunicação (a todos os interessados) e monitoramento (processo contínuo). O COSO II-ERM além das etapas do gerenciamento de riscos, também apresenta a preocupação de disseminação das informações pelos setores da organização.

O quarto *framework* utilizado no Brasil é o Índice de Risco de Desastres desenvolvido pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) subordinado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), que tem por objetivo explorar a viabilidade e utilidade deste índice de risco a nível nacional, levando em consideração o risco natural de fenômenos e vulnerabilidade social. Segundo Almeida (2016), o conceito do índice é baseado no *World Risk Index* (BIRKMANN *et al.*, 2011; WELLE *et al.*, 2012; 2013), cujos conceitos teóricos e compreensão de risco, no âmbito dos perigos naturais e da comunidade de risco de desastres, afirmam que o risco de desastres deriva de uma combinação de perigos físicos e vulnerabilidade das pessoas expostas (UNISDR, 2004; WISNER *et al.*, 2004; BIRKMANN, 2006; IDEA, 2005; IPCC, 2012). A figura 12 apresenta o Índice de Riscos de Desastres.

Figura 12 - Indicadores de Riscos de Desastres



Fonte: Almeida (2016).

No *framework* do Cemaden (figura 12), a esfera de perigos naturais é representada pela exposição a riscos naturais. A vulnerabilidade é segmentada em susceptibilidade, capacidade de enfrentamento e capacidade adaptativa que formam a esfera societária, ou seja, o quanto a sociedade pode sofrer danos.



Analisando este *framework* mais detalhadamente, pode-se analisar os termos relacionados a desastres naturais mais pormenorizadamente, através das definições de Dourado (2022): fator deflagrador, processo perigoso, perigo, susceptibilidade, elementos expostos e exposição. O quadro 6 apresenta estas definições.

Quadro 6 - Definições de fator deflagrador, processo perigoso, susceptibilidade, elementos expostos e exposição

	Fator Deflagrador	Processo Perigoso	Perigo	Susceptibilidade	Elementos Expostos	Exposição
Definição	Condição de início de um processo perigoso	Fenômeno que pode causar perdas	Condição em uma área	Predisposição natural devido a condições intrínsecas	Pessoas, bens e instalações presentes em áreas com ameaça	Condição de perda devido a sua localização
Exemplo 1	Precipitação pluviométrica > 100mm/h	Movimento de massa, enchente	Área de queda de blocos	Inclinação, geologia, tipo de solo	Comunidades, estradas, pontes	Casa em área susceptível a inundação
Exemplo 2	Variação de 25 °C na temperatura em 10 horas	Terremoto, seca	Pista escorregadia	Água subterrânea, umidade e poropressões, cobertura vegetal	Plantações, hospitais, postos de trabalho	Ponte em um trecho de rio susceptível a erosão fluvial

Fonte: Dourado (2022).

Continuando as definições dos termos utilizados em desastres naturais, apresenta-se o quadro 7, que inclui perda, dano, impactos, intensidade, vulnerabilidade e mitigação.

Quadro 1 – Definições: perda, dano, impactos, intensidade, vulnerabilidade, mitigação

	Perda	Dano	Impactos	Intensidade	Vulnerabilidade	Mitigação
Definição	Situação em que o elemento exposto perde completamente sua funcionalidade	Severidade da perda	Mudança gerada pelo processo perigoso	Quantidade de energia desprendida durante o evento	Grau de perda dos elementos expostos se ocorrer o processo perigoso	Medidas para reduzir ou limitar o impacto
Exemplo 1	Morte de uma pessoa	Cabeceira de ponte perde sustentação devido a enxurrada	Econômico, social, cultural	Alcance do movimento de massa, altura da queda de blocos	Casa projetada com especificações resistentes a terremoto	Proteção de estruturas e infraestruturas
Exemplo 2	Carro destruído por enchente	Estrada é destruída por avalanche	Ambiental	Velocidade da corrida dos blocos	Ponte projetada para suportar ventos fortes de até 100m/s	Políticas, conscientização

Fonte: Dourado (2022).

#### 4.7 Fases do Ciclo de Planejamento e Construção de Usinas Hidroelétricas

Com o objetivo de entender como o enfoque da gestão de riscos afeta os recursos hídricos, é necessário primeiramente conhecer as fases do ciclo de planejamento e construção de uma UHE. A figura 13 apresenta as fases deste ciclo.

Figura 13 - Fases do ciclo de vida de um empreendimento UHE

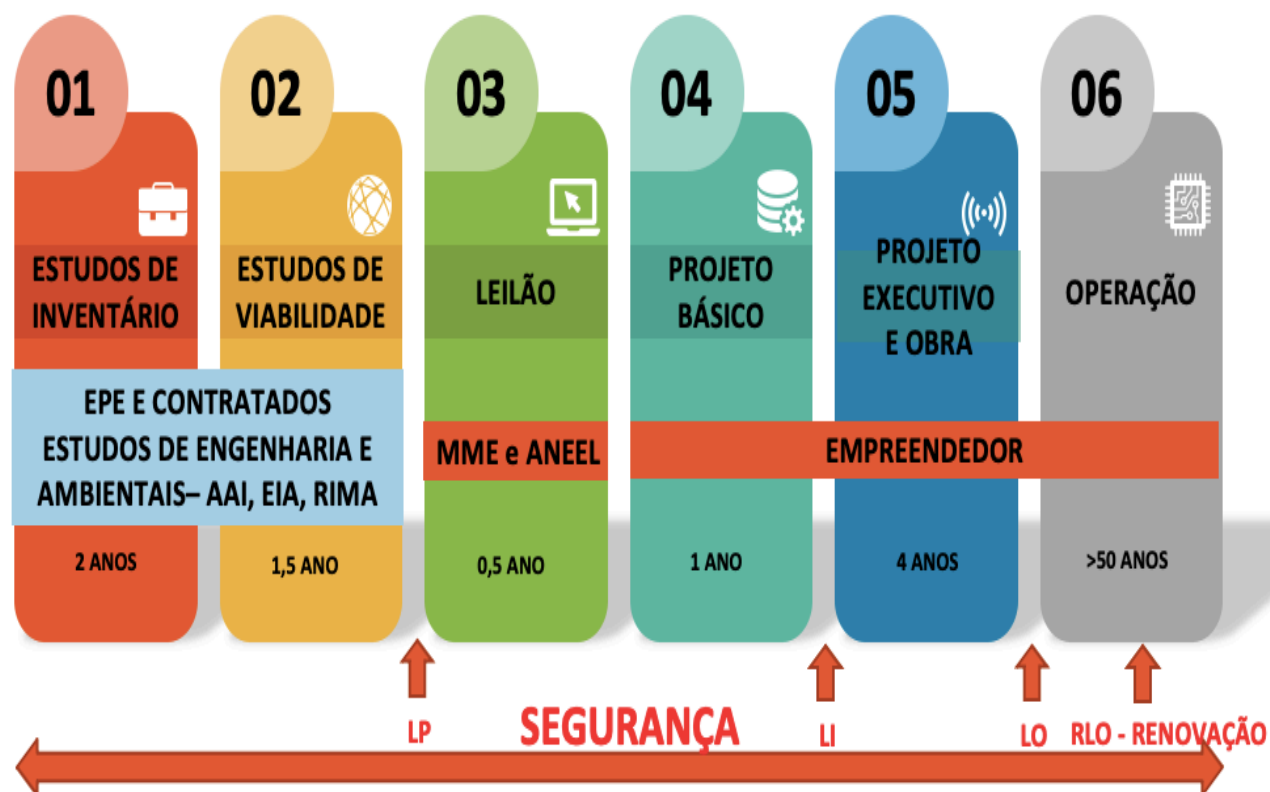


Fonte: Adaptado de Brasil-EPE (2007).

O ciclo de vida do planejamento e construção de uma UHE possui seis fases. A primeira fase é a elaboração dos projetos básico e executivo. Na segunda fase realiza-se a construção propriamente dita. Ao término da construção é realizado o primeiro enchimento (terceira fase) do reservatório com as águas do respectivo rio. Após o enchimento, se inicia a quarta fase que é a operação inicial. Na quinta fase, inicia-se a operação normal. A sexta fase acontece somente quando a vida útil do reservatório se esgotar ou no caso de sua ruptura, que é o abandono ou demolição. Todas estas fases podem ocorrer riscos e a segurança deve ser preocupação inerente em todas as fases.

A figura 13 foi detalhada em fases do ciclo de vida dos empreendimentos UHE, licenças, responsabilidades e duração. A figura 14 representa este cenário de detalhamento.

Figura 14 - Fases do ciclo de vida, licenças, responsabilidades e duração



Fonte: Adaptado de Brasil-EPE (2007).

A fase de projetos inicia pelo estudo de inventário que tem a duração de dois anos, onde são realizados os estudos de engenharia e ambientais (AAI, EIA e RIMA) pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e contratados. A Avaliação Ambiental Integrada (AAI) é um mecanismo para avaliar os impactos ambientais de um conjunto de aproveitamentos hidrelétricos em uma determinada bacia hidrográfica. O Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) são documentos técnicos exigidos pelo artigo 225, parágrafo 1º, inciso IV, da Constituição Federal de 1988 (JUSBRASIL, 2022). Segundo Moura (2006), o EIA/RIMA são utilizados para identificar, prevenir e compensar alterações ambientais prejudiciais produzidas por empreendimentos ou ações com significativo impacto ambiental.

Após a conclusão dos estudos de inventário prossegue-se com os estudos de viabilidade que também são realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), contratados e dura um ano e meio. A terceira fase é o leilão que dura seis meses e é de responsabilidade do Ministério das Minas e Energia (MME) e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A quarta fase é o projeto básico que é de

responsabilidade do empreendedor e tem a duração de um ano. A quinta fase é o projeto executivo e a construção da obra que dura até 4 anos. A sexta e última fase é a operação que pode durar mais de 50 anos.

A Licença Prévia (LP) é obtida após a fase 2 (estudos de viabilidade). A Licença de Instalação (LI) é obtida após a fase 4 (Projeto básico). A Licença de Operação (LO) é obtida após a fase 5 (Projeto executivo e construção da obra). A Renovação da LO (RLO) é realizada durante a fase 6 (Operação).

Um aproveitamento hidroelétrico (AHE) corresponde à respectiva UHE e os rios correspondentes, demandando um grande volume de água e envolvendo dois bens públicos que são o potencial de energia hidráulica (gerenciado pela ANEEL) e os recursos hídricos (gerenciado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA), sendo o uso das águas outorgado pela ANA.

As etapas dos estudos e projetos para implantação de um aproveitamento hidroelétrico (AHE) estão representadas na figura 15.

Figura 15 - Etapas dos estudos e projetos para implantação de um AHE



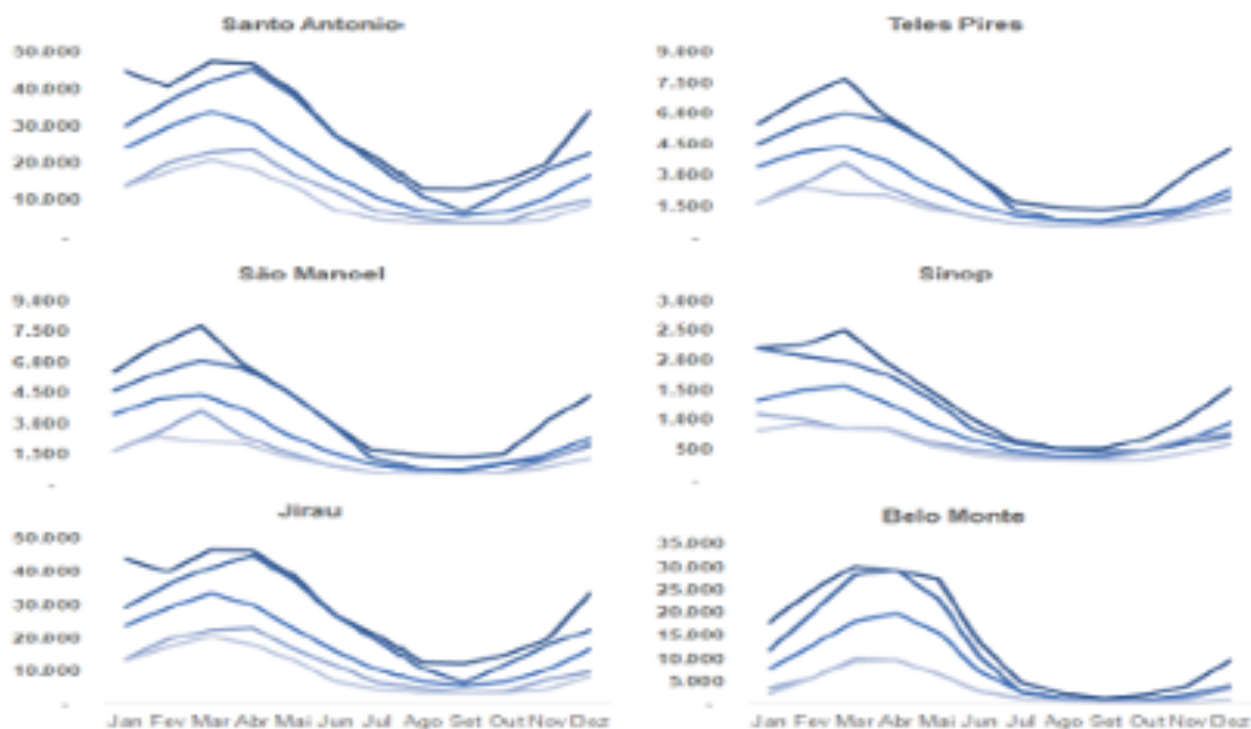
Fonte: Adaptado de Brasil-EPE (2007).

A fase 1 é a estimativa do potencial hidroelétrico com a verificação das características da bacia hidrográfica com seus aspectos topográficos, hidrológicos, geológicos e ambientais. A fase 2 são os estudos de inventário hidroelétrico através da definição da melhor divisão de queda com a identificação dos aproveitamentos

que propiciem o máximo de energia, ao menor custo e mínimo impacto ao ambiente. A fase 3 são os estudos de viabilidade através da concepção global do AHE com o dimensionamento das obras de infraestrutura, do reservatório e das ações socioambientais. A fase 4 é o projeto básico com a definição técnica dos estudos de viabilidade, especificações técnicas das obras civis, equipamentos e projetos socioambientais. Finalmente, a fase 5 é o projeto executivo com os desenhos, detalhando as obras civis e os equipamentos.

Deste modo, entendido todo o processo de planejamento e execução dos AHEs, é importante que seja apresentado o nível de vazão de algumas UHEs no Brasil, tomadas como exemplo Santo Antônio (RO), Teles Pires (PA/MT), São Manoel (PA/MT), Sinop (MT), Jirau (RO) e Belo Monte (PA). A figura 16 apresenta a vazão ( $m^3/s$ ) dos reservatórios das UHEs. Verifica-se que normalmente de janeiro a junho o volume é maior, de julho a outubro a vazão reduz bastante (período de seca) e novamente em novembro e dezembro volta a aumentar. Desse modo, geralmente no segundo semestre no Brasil acontece a seca e por consequência a crise hídrica é mais forte.

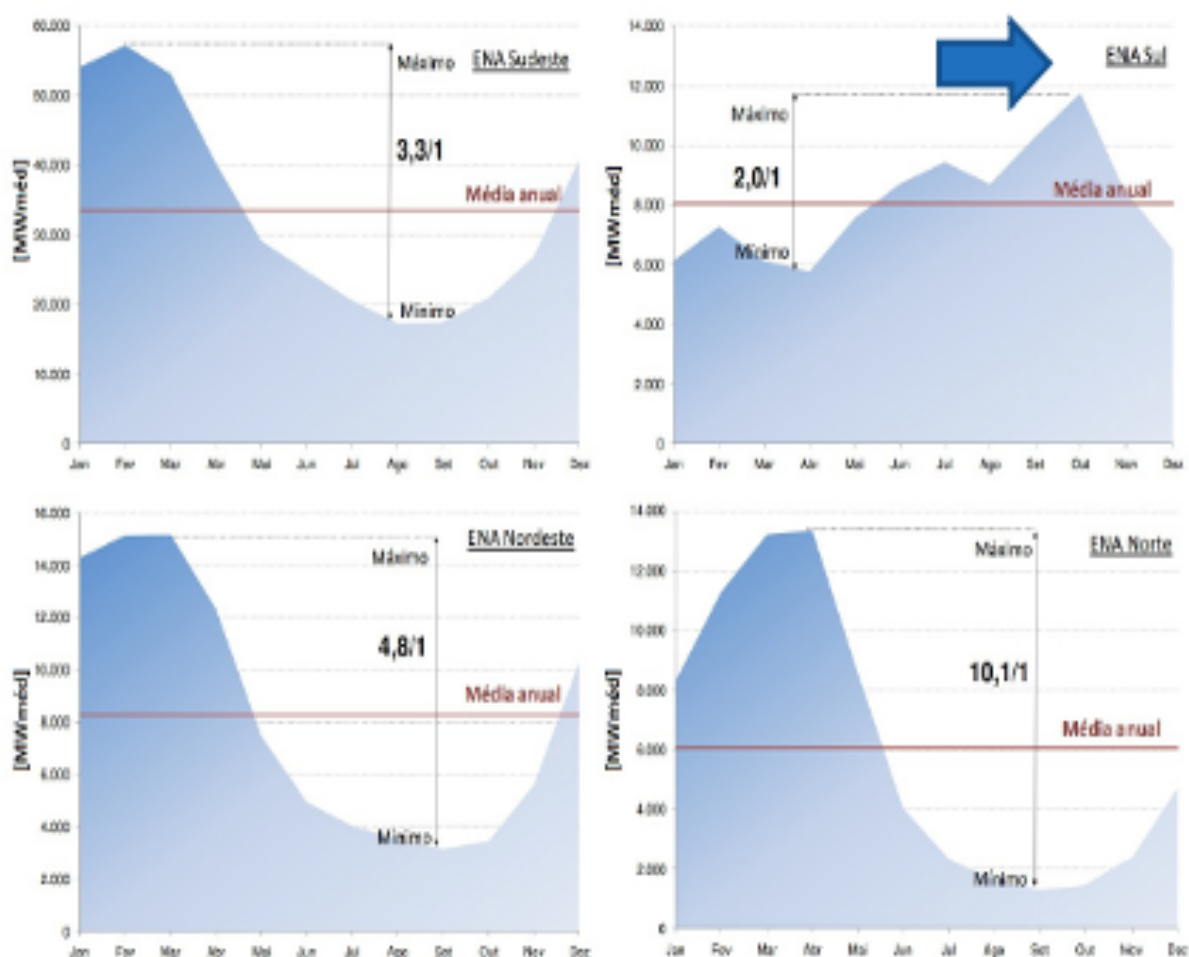
Figura 16 - Vazão em diferentes UHEs no Brasil



Fonte: Carvalho (2019).

A figura 17 apresenta a geração de energia (MWh médio) nas regiões do Brasil. A região Centro-Oeste foi apresentada na figura 16 através das UHEs São Manoel, Sinop e Teles Pires que se localizam nesta região. Pela figura 17, observa-se que nas regiões Sudeste, Nordeste e Norte, as vazões comportam-se como no Centro-Oeste, ou seja, de janeiro a junho o volume é maior, de julho outubro a vazão reduz bastante (período de seca) e novamente em novembro e dezembro volta a aumentar. A região Sul apresenta um aumento da vazão no segundo semestre, exatamente numa complementaridade às outras regiões do Brasil.

Figura 17 - Vazões nas regiões Sudeste, Nordeste, Norte e Sul



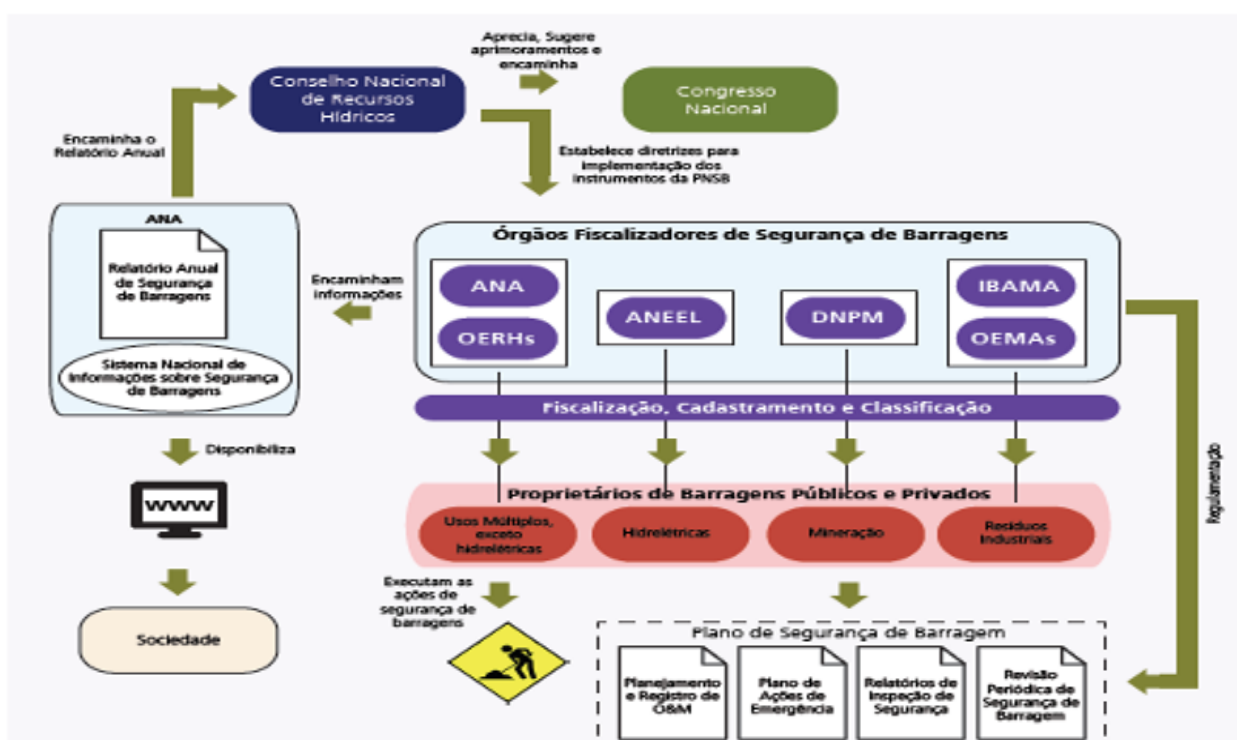
Fonte: Moromisato (2012).

## 4.8 Política Nacional de Segurança de Barragens

A Lei de segurança de barragens (LEI 12.334:2010) estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos. A Lei tem três objetivos que são garantir a observância de padrões de segurança; regulamentar e promover o monitoramento e acompanhar as ações de segurança; reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências junto à população. Estabeleceu que o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) e o Relatório de Segurança de Barragens (RSB) são de responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e o Plano de Segurança de Barragem é de responsabilidade do empreendedor (BRASIL, 2010).

A regulação e outorga da água é responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). No entanto, existem outros agentes públicos que têm responsabilidade compartilhada dos recursos hídricos. A figura 18 apresenta o arranjo da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) que foi estabelecida pela Lei de Segurança de Barragens (LEI 12.334:2010).

Figura 18 - Arranjo da Política Nacional de Segurança de Barragens



Fonte: ANA (2017).

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos analisa a PNSB, sugere aprimoramentos e encaminha para apreciação do Congresso Nacional e dos Órgãos Fiscalizadores de Segurança de Barragens (ANA, OERHs-Órgãos Estaduais de Recursos Hídricos, ANEEL-Agência Nacional de Energia Elétrica, DNPM-Departamento Nacional de Produção Mineral ou atualmente ANM-Agência Nacional de Mineração; IBAMA-Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis; OEMAs-Órgãos Estaduais de Meio Ambiente).

Os Órgãos Fiscalizadores de Segurança de Barragens encaminham informações para a ANA e realizam a fiscalização, cadastramento e classificação das barragens, encaminhando as informações para os proprietários de barragens públicos e privados, além da regulamentação do Plano de Segurança de Barragem (PSB). Estes proprietários são segmentados em usos múltiplos (exceto hidrelétricas), hidrelétricas, mineração, residenciais e industriais. Os proprietários executam as ações de segurança de barragens e elaboram o Plano de Segurança de Barragem (PSB). O PSB compõe-se do planejamento e registro de operação e manutenção, Plano de Ações de Emergência (PAE), relatórios de inspeção de segurança e revisão periódica de segurança de barragem.

A Lei de segurança de barragens foi atualizada para 14.066:2020 que adicionou alguns pontos importantes, tendo em vista os graves acidentes ocorridos com as barragens de rejeito em Mariana (2015) e Brumadinho (2019): proibiu barragens construídas pelo método de alteamento a montante (empresas tinham até 25/02/2022 para desmontar); o laudo técnico das causas do rompimento de barragem deve ser elaborado por peritos independentes, pagos pelo empreendedor, em coordenação com o órgão fiscalizador; estabeleceu multas que podem variar de R\$ 2 mil a R\$ 1 bilhão; o órgão fiscalizador pode exigir a apresentação de caução, seguro, fiança ou outras garantias financeiras; é responsabilidade legal do empreendedor a segurança da barragem e danos decorrentes de seu rompimento, vazamento ou mau funcionamento; PSB deve incluir o PAE, relatórios de inspeções de segurança, identificação e avaliação de riscos, mapa de inundação, identificação dos dados técnicos das estruturas e instalações e deve ser assinado pelo responsável técnico e presidente da empresa proprietária; PAE passou a ser obrigatório para todas as barragens de rejeitos de mineração, independentemente da classificação quanto ao dano potencial associado e ao risco. Portanto, como



observado, basicamente são considerações que dizem respeito mais às barragens de rejeito.

Para o enquadramento de uma barragem na Lei de segurança de barragens, ela deve ter uma das 4 características: altura do maciço igual ou maior a 15 metros; volume total maior ou igual a 3 milhões m<sup>3</sup>; Dano Potencial Associado (DPA) médio ou alto; ou deve conter resíduos perigosos (figura 19).

Figura 1 – Características de barragem enquadrada na Lei 12334:2010

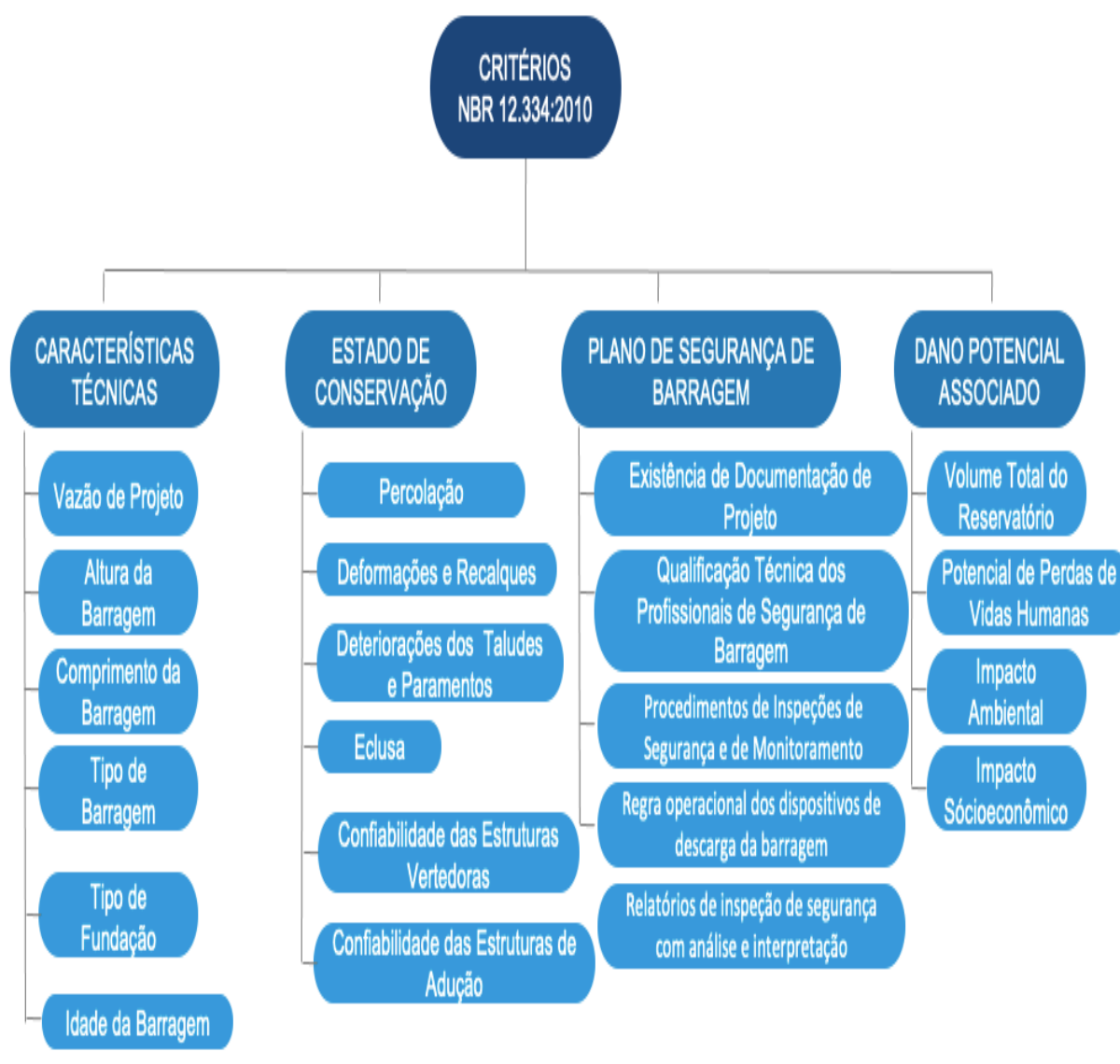


Fonte: Adaptado de Brasil (2010).

A Lei de segurança de barragens NBR 12.334:2010 definiu dois pilares: categorias de riscos e dano potencial associado. As categorias de riscos foram segmentadas em: características técnicas, estado de conservação e plano de segurança de barragem. As características técnicas foram divididas nos seguintes critérios: vazão de projeto, altura e comprimento da barragem, tipo de barragem, tipo de fundação e idade da barragem. O estado de conservação foi dividido em:

percolação, deformações e recalques, deformações dos taludes e paramentos, eclusa, confiabilidade das estruturas vertedoras e de adução. O PSB foi dividido em: exigências de documentação de projeto, qualificação técnica dos profissionais de segurança de barragem, procedimentos de inspeções de segurança e monitoramento, regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem e relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação. O Dano Potencial Associado (DPA) está relacionado com as consequências à jusante da barragem e foi dividido em: volume total do reservatório, potencial de perdas de vidas humanas, impacto ambiental e impacto socioeconômico (figura 20).

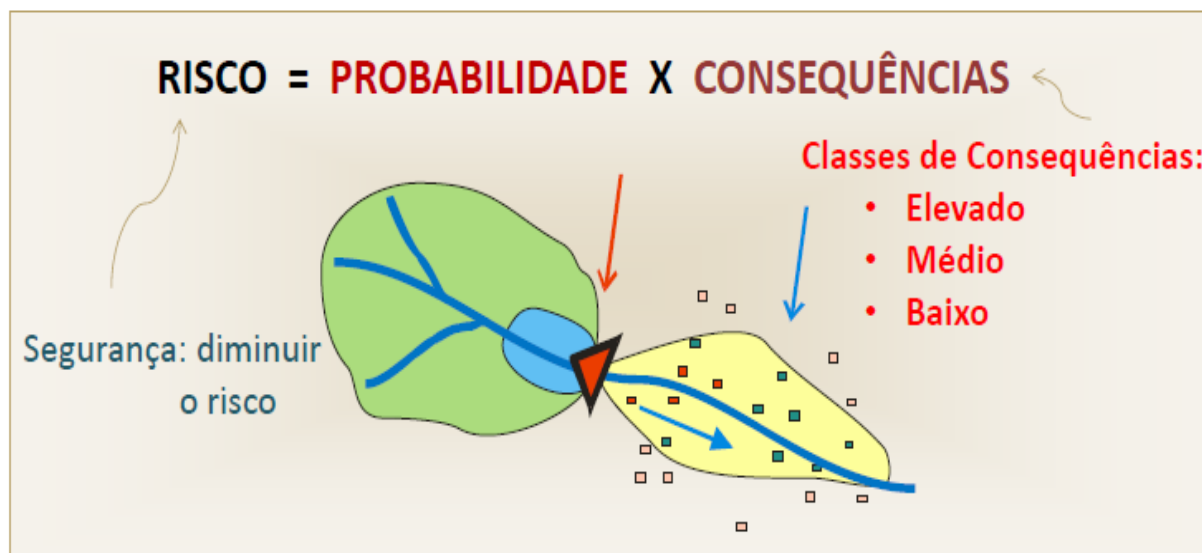
Figura 20 - Pilares da Lei 12334:2010



Fonte: Adaptado de Brasil (2010).

O valor esperado (VE) do risco é a probabilidade multiplicada pelo impacto. A probabilidade é dada pela categoria de riscos e o impacto pelo Dano Potencial Associado (DPA). A figura 21 apresenta um esquema do cálculo do VE.

Figura 21 - Esquema do cálculo do Valor Esperado



Fonte: Adaptado de Afonso (2015).

O referencial teórico da Lei de Segurança de Barragens se fez necessário na dissertação, porque uma das contribuições da dissertação é a adaptação da Lei às barragens da Eletrobras Furnas, bem como desta metodologia foram também utilizadas variáveis que serviram para a construção da MARR.

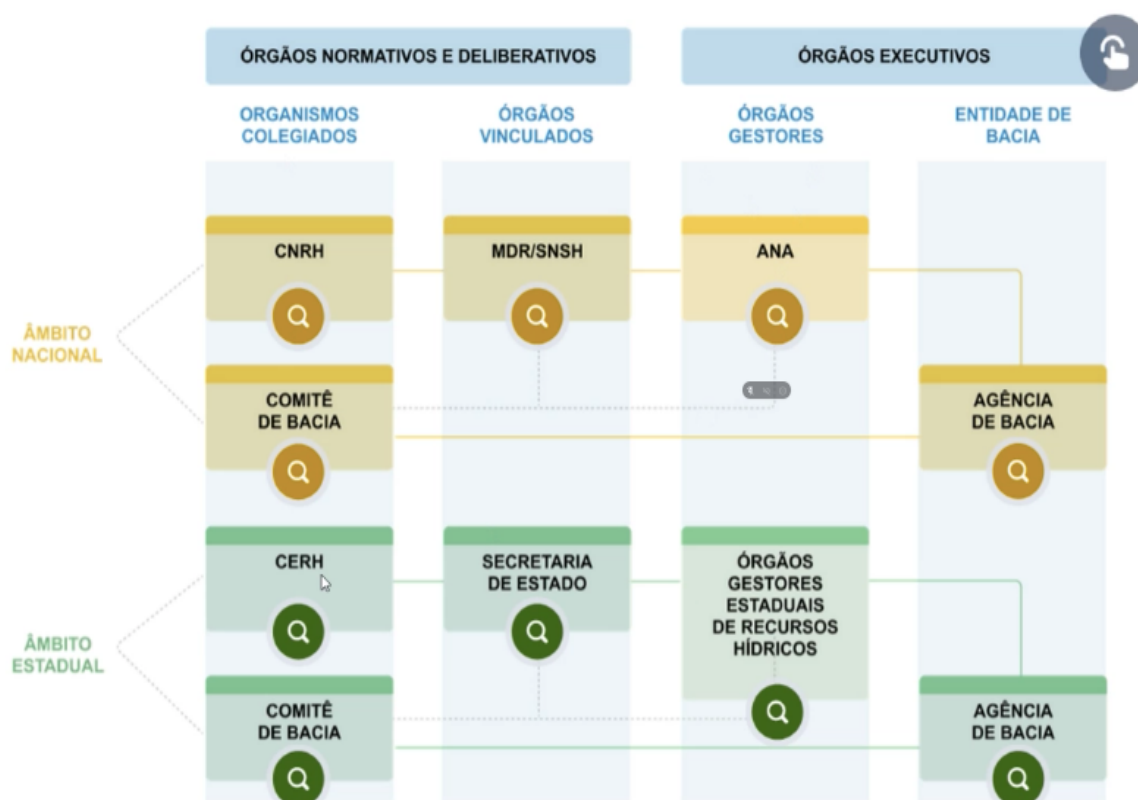
#### 4.9 Política Nacional de Recursos Hídricos

A governança dos recursos hídricos é implementada pela Política Nacional de Recursos Hídricos a partir da Lei 9.433:1997 conhecida como Lei das Águas, a qual estabeleceu o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). A matriz e funcionamento do arranjo do SINGREH é apresentada na figura 22.

Figura 22 - Matriz e funcionamento do arranjo do SINGREH



## Matriz Institucional do SINGREH



Fonte: Relatório Conjuntura 2021 - ANA

Fonte: ANA (2022).

O SINGREH é o conjunto de órgãos e colegiados que concebe e implementa a Política Nacional das Águas e tem como objetivo principal realizar a gestão dos

usos da água de forma democrática e participativa, coordenando a gestão integrada das águas; arbitrando administrativamente os conflitos relativos aos recursos hídricos; planejando, regulando e controlando o uso e a recuperação dos corpos hídricos e promover a cobrança pelo uso das águas. É composto, pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), pelo Ministério do Desenvolvimento Regional/Secretaria Nacional de Segurança Hídrica (MDR/SNSH), pelos Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos (CERH), pelas Secretarias de Estado e pelos Comitês de Bacia Hidrográfica que têm a responsabilidade de formular a política de recursos hídricos. Como implementadores dos instrumentos da política que fazem parte do SINGREH, estão a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), os Órgãos Gestores Estaduais de Recursos Hídricos e as Agências de Bacia (Adaptado de ANA, 2022).

Deste modo, verifica-se que a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) englobam um arranjo de entidades cuja atuação depende de todas para que realmente as políticas sejam planejadas, implementadas e tragam benefícios à sociedade e às organizações visando o bem comum que é a evolução do Brasil. Diante do exposto, é natural que aconteçam riscos dos mais variados e, obviamente, suas consequências podem ser danosas ao país, sociedade e organizações.

#### 4.10 **Frameworks para Identificação de Riscos: FMEA/FMECA, ETA e ISHIKAWA**

Estes *frameworks* são gráficos que têm o objetivo de auxiliar na identificação de riscos, bem como suas causas e consequências. Nesta dissertação serão utilizados os *frameworks Failure Mode, Effect and Criticality Analysis* (Análise dos Modos de Falha, seus Efeitos e Severidade - FMECA), *Event Tree Analysis* (Análise por Árvore de Eventos - ETA) e o diagrama de causa e efeito Ishikawa.

O método Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA), a partir de um modo de falha, avalia suas causas, a sequência de seus efeitos, os meios de sua detecção, de sua prevenção e de mitigação dos seus efeitos, conforme o exemplo do quadro 8. Segundo Hartford (1999) e Santos *et al.* (2011), FMEA é o método de

análise por meio do qual as consequências de modos de falha de um componente são sistematicamente identificadas e analisadas. Segundo Caldeira (2008), FMEA é um método qualitativo, pois utiliza de uma forma descritiva ou ordenação numérica para descrever a grandeza das consequências potenciais e a probabilidade da ocorrência dessas consequências. Ainda segundo a mesma autora, em um método qualitativo, os resultados podem ser significativamente afetados pela experiência pessoal dos avaliadores, bem como pelas respectivas preocupações ou interesses particulares.

Quadro 8 - Exemplo de FMEA

Identificador	Modo de Falha	Causas	Efeitos	Meios de Detecção/Prevenção
01	Excedida a capacidade de escoamento do vertedouro	Cheia superior à cheia de projeto	1. Galgamento 2. Onda de cheia no vale à jusante	1. Medição do nível da água do reservatório 2. Considerar folga adequada no projeto 3. Alçamento 4. Acionamento do Plano de Emergência 5. Construir um descarregador de emergência 6. Acionar sistema de aviso e alerta

Fonte: Adaptado de Colle (2008).

A figura 23 apresenta parte da hierarquização para uma abordagem funcional de uma barragem (SANTOS, 2006).

Figura 23 - Hierarquização funcional de uma barragem



Fonte: Santos (2006).

Ao se aplicar escalas de probabilidade de ocorrência das falhas e de gravidade dos seus efeitos ao método FMEA, tem-se o método Análise dos Modos de Falha, seus Efeitos e Severidade (FMECA), de análise de risco semiquantitativo (Caldeira, 2008). Segundo a autora, os métodos semiquantitativos são métodos qualitativos cujas escalas integram valores numéricos das probabilidades atribuídas aos modos e às consequências da ruptura. Pensamento semelhante é o argumento de Hartford (1999), onde a FMECA completa o FMEA ao levantar a probabilidade de ocorrência e consequência para cada modo de falha.

Segundo Santos (2006) e Caldeira (2008), o método de análise de riscos de um sistema através da FMECA nos sistemas geotécnicos é semiquantitativo. Ao contrário do que acontece em outros sistemas, nas obras geotécnicas, em geral, não existem dados suficientes para proceder a análises puramente probabilísticas. Tal dificuldade pode ser ultrapassada com a utilização de métodos de análise semiquantitativos, em que a probabilidade de ocorrência dos eventos e a severidade das suas consequências no sistema são ordenados em classes. De modo semelhante, os rios podem ter riscos que também são difíceis de mensurar com análises probabilísticas e, portanto, o FMECA se mostra um importante *framework* para tratar riscos de recursos hídricos.

De acordo com Santos (2006) e Caldeira (2008), conhecida a severidade das consequências de cada possível modo de ruptura do sistema, a sua criticidade só fica perfeitamente definida com a avaliação da verossimilhança (probabilidade) da ocorrência dos efeitos globais dos modos de ruptura. No quadro 9, apresentam-se as classes de probabilidade constantes na norma MIL–STD 1629A (*US Department of Defense*, 2005). Existem cinco categorias de probabilidade de ocorrência de um evento, com classificações entre A-Improvável e E-Frequente e a cada uma está associada uma descrição.

Quadro 9 - Classes de probabilidade

Classes	Probabilidade	Classificação	Descrição
A	< 0,1%	Improvável	Muito baixa probabilidade
B	0,1% a 1%	Remota	Possível, mas de baixa probabilidade
C	1 a 10%	Ocasional	Ocorrência ocasional
D	10 a 20%	Provável	Ocorrência possível e provável
E	>20%	Frequente	Ocorrência regular

Fonte: US Department of Defense (2005).

As classes de severidade têm de ser capazes de refletir de modo gradual todo um conjunto de situações, desde a mais catastrófica até a mais insignificante. A escolha e a descrição das classes de severidade devem ser claras, objetivas e cuidadosas para que a sua atribuição aos efeitos globais dos modos potenciais de ruptura seja a mais direta possível. As consequências dos modos de ruptura podem ser agrupadas em diferentes áreas de interesse, tais como, saúde e segurança de pessoas, ambiente, economia/destruição e censura da opinião pública. Cada área de interesse é definida com base em atributos específicos, tais como fatalidades, perdas econômicas, impactos ambientais, consequências políticas e censura pública, dentre outras. Assim, as classes de severidade podem ser atribuídas separadamente a cada uma das diferentes áreas de interesse conforme o quadro 10 (SANTOS, 2006; CALDEIRA, 2008).

Quadro 10 – Classes de severidade

Classes de Severidade	Áreas de Interesse			
	Saúde e segurança de pessoas	Ambiente	Econômicos / Destruição (Impacto)	Censura da opinião pública
I	Negligenciável	Sem impacto mensurável	Baixo (< US\$10.000)	Nenhuma
II	Pequenos primeiros socorros	Pequenos impactos na zona	Médio (US\$10.000- US\$100.000)	Baixa
III	Pequenos ferimentos	Violação legal ou permitida	Médio a alto (US\$100.000 a US\$1 milhão)	Baixa a Média
IV	Incapacidade temporária	Prejuízo local	Alto (US\$1 a US\$10 milhões)	Média
V	Incapacidade permanente / fatalidade	Impacto significativo (grande, mas reversível)	Muito alto (US\$10 a US\$100 milhões)	Média a Alta
VI	Várias fatalidades	Impacto catastrófico (grande e irreversível)	Massivo (> US\$ 100 milhões)	Alta

Fonte: Adaptado de Santos (2006); Hartford e Baecher (2004); Robertson *et al.* (2003).

Segundo Santos (2006), a criticidade de cada modo de ruptura (MR) só fica perfeitamente definida quando se relaciona a severidade das consequências no sistema com a possibilidade de ocorrência dos eventos que lhe dão origem, obtidos, respectivamente, através das classes de severidade e de verossimilhança. A criticidade do par (Probabilidade, Impacto) é calculada pelo índice de criticidade ( $I_{cr}$ ), indicado na equação 1.

$$I_{cr} = P \times I \quad (1)$$

Onde:



P = Índice atribuído à possibilidade de ocorrência (probabilidade) de um dado modo de ruptura;

I = Índice atribuído à severidade (impacto) das consequências dos seus efeitos finais.

O mesmo autor define ainda as classes de probabilidade (quadro 11) e severidade ou impacto (quadro 12). Esses valores devem ser selecionados de forma a representar o grau de importância de cada classe relativamente às restantes. A sua atribuição, apesar de subjetiva, tem de estar em concordância com a definição atribuída a cada classe. A escala das classes é crescente em termos da sua importância relativa, mas o intervalo entre os valores pode não ser regular, ou seja, uma classe pode ter maior relevância, relativamente às adjacentes.

Quadro 11 - Índices das classes de probabilidade

Classes de Probabilidade	Índice de Probabilidade (P)
A – Improvável	1
B – Remota	2
C – Ocasional	4
D – Provável	7
E - Frequente	10

Fonte: Santos (2006).

Quadro 12 - Índices das classes de impacto

Classes de Impacto	Índice de Impacto (I)
I – Sem impacto	1
II – Pequeno	2
III – Moderado	4
IV – Alto	6
V – Significativo	9
VI - Catastrófico	10

Fonte: Santos (2006).

O quadro 13 apresenta a FMECA considerando o exemplo realizado para a FMEA, incluindo adicionalmente a Criticidade, respectiva da FMECA.

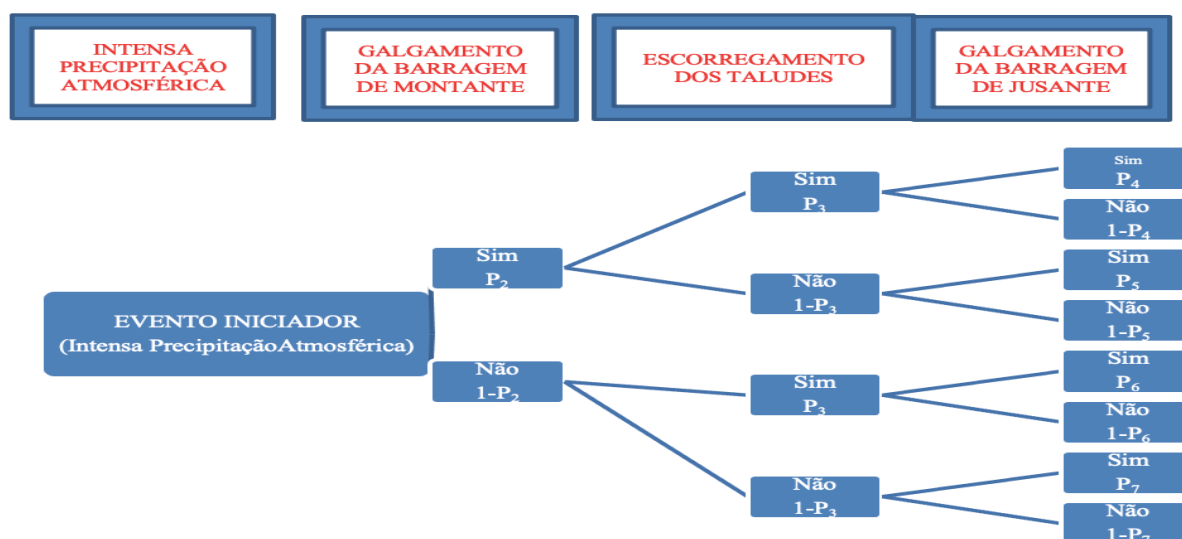
Quadro 13 - Exemplo de FMECA

Identificador	Modo de Falha	Causas	Índice de Criticidade $I_{cr} = 2 \times 9 = 18$		Efeitos	Meios de Detecção/Prevenção
			Probabilidade (Quadro 7)	Impacto (Quadro 10)		
01	Excedida a capacidade de escoamento do vertedouro	Cheia superior à cheia de projeto	2=Remota	9=Significativo	1.Galgamento 2.Onda de cheia no vale à jusante	1. Medição do nível da água do reservatório 2. Considerar folga adequada no projeto 3. Alçamento 4. Acionamento do Plano de Emergência 5. Construir um descarregador de emergência 6. Acionar sistema de aviso e alerta

Fonte: Adaptado de Colle (2008).

O método de Análise por Árvores de Eventos (ETA) permite calcular a probabilidade de ocorrência de sequências de eventos a partir de um determinado acontecimento iniciador que pode conduzir a falhas relevantes, conforme o exemplo da figura 24. De acordo com Baecher e Christian (2000) e Caldeira (2008), a ETA é uma forma conveniente de desagregar as sequências de ruptura em partes, de mais fácil tratamento, e de combinar, de modo lógico e coerente, os resultados obtidos para calcular a confiabilidade do sistema global. Ainda segundo Caldeira (2008), a ETA é o método mais frequentemente utilizado para a realização de análise de riscos em engenharia civil.

Figura 24 - Exemplo de ETA de um potencial perigo (intensa precipitação)



Fonte: Adaptado de Caldeira (2008).

O risco é calculado em cada patamar ou ramificação da árvore de eventos, sendo o risco total, igual a soma de todos os patamares ou ramificações. A árvore de eventos representa sequências de eventos que podem resultar em consequências adversas, estrutura, geotécnica, hidrológica, sísmica, dentre outras. Cada nó da representação gráfica da árvore resulta na possibilidade ou não do evento ocorrer (CYGANIEWICZ e SMART, 2000).

Pela ETA da figura 24, constata-se que a probabilidade do galgamento da barragem de jusante, quando acontecer também o galgamento da barragem de montante associado ao escorregamento dos taludes do reservatório, é de  $P_2 \times P_3 \times P_4$ . Para o galgamento da barragem de jusante acontecer sem que o escorregamento dos taludes aconteça e acontecendo o galgamento da barragem de montante é de  $P_2 \times (1 - P_3) \times P_5$ . A probabilidade de acontecer o galgamento da barragem de jusante, acontecendo antes o escorregamento dos taludes, mas sem que aconteça o galgamento da barragem de montante, é de  $(1 - P_2) \times P_3 \times P_6$ . A probabilidade de não acontecer o galgamento da barragem de jusante, sem acontecer o escorregamento dos taludes e sem acontecer o galgamento da barragem montante é de  $(1 - P_2) \times (1 - P_3) \times (1 - P_7)$ .

Segundo Caldeira (2008), o objetivo final da ETA é proporcionar indicações sobre o funcionamento da barragem, mediante as incertezas associadas ao seu desempenho. A probabilidade de ruptura reflete a incerteza agregada no conhecimento acerca do desempenho funcional do ambiente natural onde se insere e dos processos naturais e humanos que podem afetá-la.

Cyganiewicz e Smart (2000), recomendam que a ETA seja utilizada devido à sua capacidade para modelar as características particulares de uma barragem em estudo, mas sugere que os resultados sejam verificados através de métodos de desempenho históricos. Ainda segundo Caldeira (2008), as ETAs constituem uma base para a análise de situações com consequências de eventos não totalmente conhecidos, mas que podem ser revelados através da introdução de opinião de peritos, sendo considerada uma estrutura de conhecimento ou de convicção.

Completadas as etapas para todos os nós, o processo de análise de risco continua com a identificação e quantificação das consequências adversas que podem resultar dos modos de falha identificados nas árvores de eventos (CYGANIEWICZ e SMART, 2000, apud COLLE, 2008).

O diagrama de Ishikawa é um diagrama de causa e efeito, onde são definidas uma ou mais causas, tendo como consequência um efeito. Estas causas podem acontecer ao mesmo tempo ou pode acontecer somente uma causa para que determinado efeito aconteça. Tem a função de indicar em um único diagrama os efeitos que podem acontecer, para que se possam definir ações de mitigação para determinado risco ou efeito. É importante ressaltar que os planos de ação são desenvolvidos para as causas dos riscos e não para o risco em si.

Este capítulo apresentou diversos exemplos de riscos que aconteceram no Brasil e no mundo, as leis e normas referentes a riscos, ciclo de planejamento e construção de UHEs e da implantação de AHEs. Descreveu ainda a PNSB e PNRH que são a base para o início da identificação das variáveis inerentes aos possíveis riscos que podem impactar os reservatórios. Também descreveu os principais frameworks para tratamento de riscos que são o FMECA, ETA e Ishikawa. O próximo capítulo trata da área de estudo.

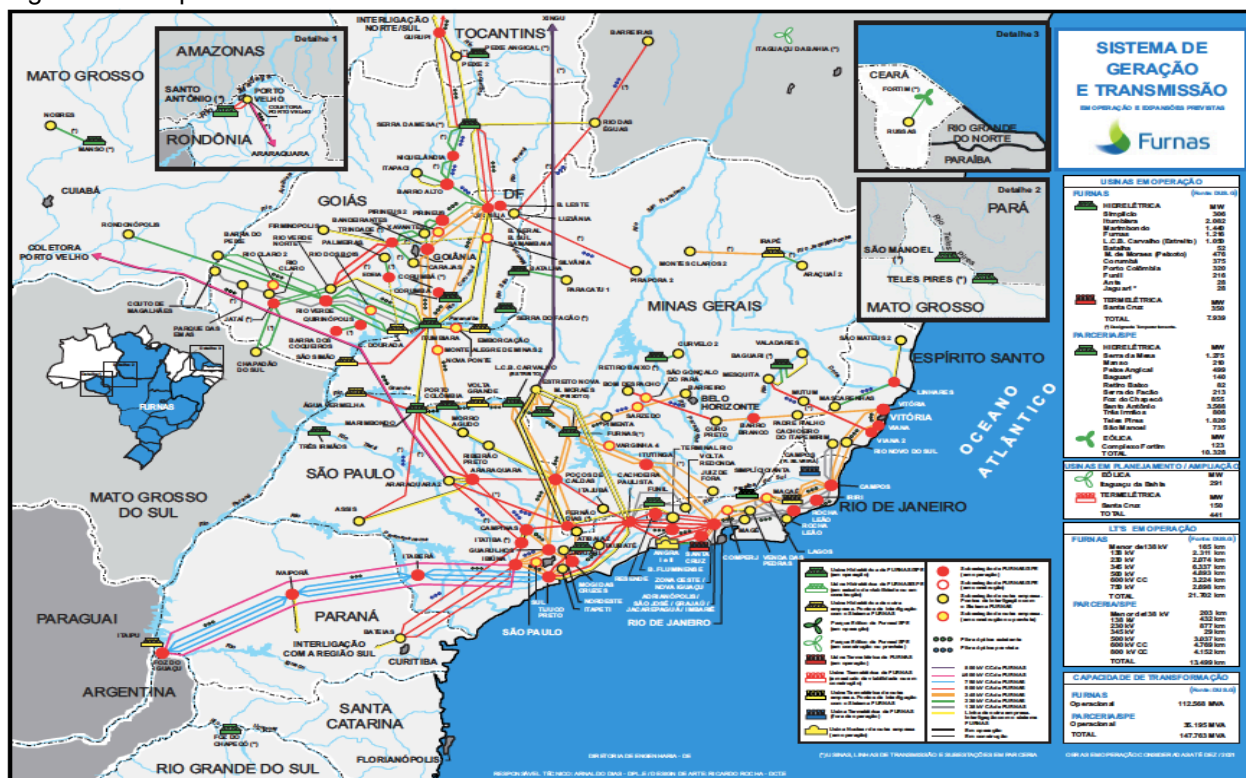
## 5 ÁREA DE ESTUDO

Este capítulo trata da área de estudo, a qual se desenvolveu a dissertação.

A área de interesse do estudo da pesquisa são os reservatórios.

A Eletrobrás Furnas era, até julho de 2022, uma empresa de economia mista, subsidiária da Eletrobrás e vinculada ao Ministério de Minas e Energia do Brasil. Atualmente foi privatizada e tornou-se uma empresa de capital aberto. É dedicada a geração e transmissão de energia elétrica e nasceu com o desafio de sanar a crise energética que ameaçava o país na década de 1950. A Usina de Furnas foi a primeira hidrelétrica de grande porte do Brasil, com capacidade de 1.216 MW, implantada no rio Grande, Estado de Minas Gerais (MG) em 1958. Em 1963, através do Decreto Federal nº 41.066, a empresa Central Elétrica de Furnas começou a funcionar efetivamente, em Passos (MG). A Eletrobrás Furnas Centrais Elétricas S.A. possui atualmente um sistema com 22 usinas hidrelétricas, duas termelétricas e mais de 23.000 km de linhas de transmissão, além de 65 subestações e 3 parques eólicos. A figura 25 apresenta o mapa com as usinas e linhas de transmissão.

Figura 25 - Mapa com as usinas e linhas de transmissão



Fonte: FURNAS (2022).

Com sede na cidade do Rio de Janeiro, a Eletrobras Furnas possui empreendimentos no Distrito Federal e nos estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Espírito Santo, Tocantins, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Rondônia, São Paulo, Rio Grande do Norte e Ceará. Os empreendimentos foram construídos com recursos próprios e em parceria com outras empresas. Mais de 40% da energia consumida no Brasil passa por esse sistema, que utiliza a força da água para gerar 95% de sua energia através das hidrelétricas. A empresa garante o fornecimento de energia para locais onde estão situados 63% dos domicílios brasileiros, que respondem por 81% do Produto Interno Bruto (PIB). A missão da empresa é atuar com excelência empresarial e responsabilidade socioambiental no setor de energia elétrica, contribuindo para o desenvolvimento da sociedade.

Este capítulo apresentou a área de estudo em que foi desenvolvida a dissertação. O próximo capítulo trata da metodologia.

## 6 METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia utilizada na dissertação, com sua abordagem, natureza e objetivos, descrevendo as etapas do desenvolvimento do estudo.

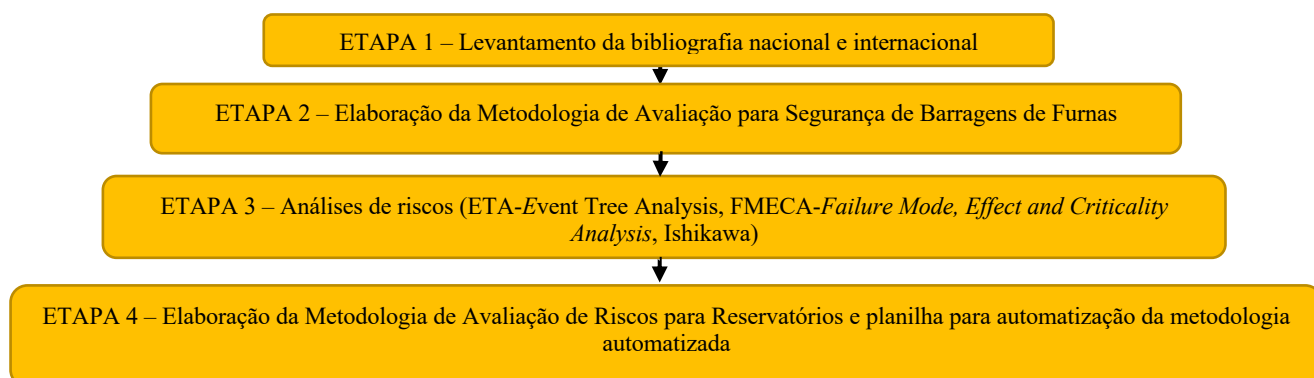
Segundo Silveira e Córdova (2009), a abordagem pode ser qualitativa ou quantitativa. A qualitativa trata da objetivação do fenômeno e hierarquização das ações de descrever, compreender e explicar o fenômeno. Na abordagem quantitativa, os resultados podem ser quantificados, geralmente são generalizados, recorrendo à linguagem matemática para descrever as causas do fenômeno e as relações entre variáveis. Ainda segundo as autoras, os elementos fortes de uma complementam as fraquezas da outra, fundamentais ao maior desenvolvimento da ciência.

Esta dissertação possui abordagem quantitativa, que é realizada através da definição das variáveis, seus atributos, faixa de valores e pesos para construção da metodologia de riscos para avaliação de reservatórios.

Segundo Silveira e Córdova (2009), quanto à natureza, divide-se em pesquisa básica e aplicada. As autoras definem natureza básica como sendo aquela que gera novos conhecimentos, úteis ao avanço da ciência. Definem ainda pesquisa aplicada como aquela que cria conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos. Esta pesquisa caracteriza-se como natureza aplicada.

Quanto aos objetivos, Gil (2007), divide as pesquisas em exploratória, descritiva e explicativa. Segundo o autor, a pesquisa exploratória visa compreender melhor um problema, tornando-o mais explícito, podendo envolver levantamento bibliográfico. A pesquisa descritiva objetiva descrever os fenômenos de determinada realidade, podendo envolver análise documental. A pesquisa explicativa identifica fatores que podem contribuir para a ocorrência dos fenômenos. Em função dos objetivos, esta pesquisa se enquadra como exploratória porque envolve a criação de nova metodologia como inovação da pesquisa. O desenvolvimento do estudo foi segmentado em quatro etapas (figura 26).

Figura 26 - Etapas do desenvolvimento da dissertação



Fonte: O Autor, 2023.

A etapa 1 trata do levantamento da bibliografia nacional e internacional sobre o tema, através de livros e artigos publicados em revistas técnicas e congressos. Os *sites* pesquisados foram: periódicos CAPES (disponível em: <https://www-periodicos-capes-gov-br.ez1.periodicos.capes.gov.br/index.php/buscaador-primo.html>), Google Scholar ou Google Acadêmico (disponível em: <https://scholar.google.com.br/>), Science Direct (disponível em: <https://www.sciencedirect.com>), Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal do Mato Grosso (disponível em: <https://ufmt.br/ppgrh>), Pós-Graduação em Geoquímica Ambiental da Universidade Federal Fluminense (disponível em: <https://app.uff.br>) e pesquisa na base do ProfÁgua de 2016 a 2021 na Universidade Estadual do Rio de Janeiro (disponível em: [http://www.profagua.uerj.br/lista\\_dissertacao.htm](http://www.profagua.uerj.br/lista_dissertacao.htm)).

Nos *sites* foram pesquisados artigos publicados no período de 2012 a 2022, ordenado por relevância, utilizando as palavras-chave: metodologia, *methodology*, risco, *risk*, recursos hídricos, *water resources*, gestão de bacias hidrográficas, *river basin management*, rios, rivers.

Na etapa 2 é a elaboração da Metodologia de Avaliação para Segurança de Barragens da Eletrobras Furnas.

A etapa 3 trata da utilização das ferramentas *Event Tree Analysis* (ETA), *Failure Mode, Effect and Criticality Analysis* (FMECA) e o diagrama de causa e efeito Ishikawa para identificação dos riscos, suas causas e consequências.

A elaboração da MARR e o desenvolvimento da planilha para automatização do cálculo da metodologia estão na etapa 4.



Este capítulo descreveu a metodologia com suas características e etapas do desenvolvimento da dissertação. O próximo capítulo descreve a metodologia de avaliação para segurança de barragens da Eletrobras Furnas.

## 7 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO PARA SEGURANÇA DE BARRAGENS DA ELETROBRAS FURNAS

Apresenta-se neste capítulo a metodologia definida pela Lei de Segurança de Barragens (LEI 12.334:2010) com seus indicadores, critérios de riscos e dano potencial associado, adaptada para barragens e reservatórios de maior capacidade, como as da Eletrobras Furnas. Ressalta-se ainda, que estas são sugestões de melhoria para a metodologia desenvolvida pela Lei 12.334:2010. Este novo modelo adaptado tem o nome de Método Eletrobras Furnas de Segurança de Barragens. Este capítulo da dissertação é importante, pois servirá como um dos pilares para a elaboração da metodologia de riscos para avaliação de reservatórios.

Os primeiros critérios selecionados foram os que são sugeridos por atenderem à Lei 12.334/2010 (Métodos de MENESCAL *et al.*, 2001 e Método CNRH, 2012), pois são obrigatórios, a partir de 2010, para análise da segurança de barragens e riscos no Brasil. A classificação das barragens utiliza como pilares a segurança estrutural e impacto para as populações a jusante. Segundo o mesmo Manual, esses critérios, bem como seu modelo de pontuação, podem ser ajustados para as barragens de cada instituição específica.

Portanto, os critérios sugeridos que atendem à Lei 12.334/2010 e que farão parte dos critérios do Método Eletrobras Furnas são: Vazão de Projeto, Volume do Reservatório, Dimensão da Barragem (Altura e Comprimento), Idade da Barragem, Qualificação Técnica dos Profissionais de Segurança da Barragem, Relatório de Segurança da Barragem, Existência de Projeto, Estabilidade de Taludes, Percolação, Deformações, Tipo de Barragem, Tipo de Fundação, Confiabilidade das Estruturas Vertedoras, Confiabilidade das Estruturas de Adução, Frequência de Avaliação do Comportamento, Impacto Econômico, Social e Ambiental a Jusante. Estas definições corroboram os resultados de Dias (2010).

Além desses, verificou-se outros critérios que não estão dentre os que foram sugeridos pelo Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, mas que, de alguma forma, são importantes, no sentido de definição da priorização das barragens, dentro do portfólio de barragens; e dentro da própria barragem, estabelecer quais os critérios que não estão sendo atendidos adequadamente. Dessa maneira, selecionou-se adicionalmente os seguintes critérios:

- a) Capacidade de Geração: Trata-se de um critério que pode servir para dimensionar o custo x benefício de se manter determinada barragem em funcionamento e, também, para priorizar o tratamento de problemas ou riscos que podem acontecer;
  - b) Custo da Barragem: É um critério que pode servir para priorizar o custo x benefício de se manter determinada barragem em comparação, por exemplo, com o critério de Capacidade de Geração, pois o custo pode ser elevado em comparação com outra barragem e ter uma menor capacidade de geração;
  - c) Condições dos Equipamentos: É um critério importante para inspeção de barragens e juntamente com os critérios de geologia e hidrologia, formam a base para verificação da inspeção de barragens;
  - d) Sistemas de Aviso e Alerta: Trata-se de um critério importante para a segurança da população à jusante e que se tornou obrigatória para UHEs.
- a. Após a seleção de todos os critérios que farão parte do Método Eletrobrás Furnas, realizou-se a segmentação desses critérios por três categorias. Desse modo, definiu-se os Indicadores dessas categorias:
- a) Periculosidade Potencial (PP): Trata-se do indicador que tem o objetivo de mensurar a barragem quanto ao tipo de estrutura, mensurando aspectos estruturais;
  - b) Vulnerabilidade Potencial (VP): Esse indicador mensura a barragem quanto à sua construção, elementos geotécnicos, geológicos e condições dos equipamentos que podem afetar o comportamento da mesma e quanto à emissão do relatório de segurança adequado à inspeção da barragem;
  - c) Impacto Potencial (IP): Trata-se do indicador para mensurar o impacto social, econômico e ambiental a jusante, se acontecer um problema grave que venha a comprometer parte significativa da barragem ou mesmo toda a barragem.

A categoria de Periculosidade Potencial (PP) inclui os seguintes critérios de mensuração: Vazão de Projeto-VP; Dimensão do Reservatório (Altura-AR e Comprimento-CR); Tipo de Barragem-TB; Tipo de Fundação-TF.

A categoria de Vulnerabilidade Potencial (VP) inclui os seguintes critérios de mensuração: Idade da Barragem-IB; Qualificação Técnica dos Profissionais de Segurança de Barragens-QT; Relatório de Segurança de Barragem-RS; Existência de Projeto-EP; Estabilidade de Taludes-ET; Percolação-PE; Deformações-DE; Confiabilidade das Estruturas Vertedoras-EV; Frequência de Avaliação do Comportamento da Barragem-FA; Condições dos Equipamentos-CE.

A categoria de Impacto Potencial (IP) inclui os seguintes critérios de mensuração: Volume do Reservatório-VR; Impacto Econômico a Jusante-IE; Impacto Social a Jusante-IS; Impacto Ambiental a Jusante-IA; Custo da Barragem-CB; Capacidade de Geração-CG; Sistemas de Aviso e Alerta-SA.

O indicador Periculosidade Potencial (PP) será mensurado pela equação 2:

$$PP = VP + AR + CR + TB + TF \quad (2)$$

O indicador Vulnerabilidade Potencial (VP) será mensurado pela equação 3:

$$VP = IB + QT + RS + EP + ET + PE + DE + EV + FA + CE \quad (3)$$

O indicador Impacto Potencial (IP) será mensurado pela equação 4:

$$IP = VR + IE + IS + IA + CB + CG + SA \quad (4)$$

Portanto, o Potencial de Risco (PR) será calculado pela equação 5, que se assemelha ao cálculo do risco, quando se multiplica a probabilidade pela consequência ( $R = P \times C$ ), onde a Probabilidade (P) será a soma dos indicadores PP e VP ( $P = PP + VP$ ), e a Consequência ou impacto, é descrita pelo indicador IP:

$$PR = (PP + VP) \times IP \quad (5)$$

Dessa maneira, tem-se que o indicador Periculosidade Potencial está mais relacionado com os aspectos construtivos da barragem; o indicador Vulnerabilidade Potencial relaciona-se aos resultados das inspeções na barragem e o indicador Impacto Potencial está mais relacionado com o impacto que poderá ocorrer a jusante, se algum problema grave acontecer.

Considerando que quanto maior o valor do Potencial de Risco (PR), maior será o risco a que está sujeita a barragem, tem-se que um maior valor de cada variável, corresponderá ao pior caso, ou seja, o maior Potencial de Risco.

Portanto, as variáveis definidas terão os seguintes valores:

- Vazão de Projeto-VP (T = Período de Retorno em “anos”):
  - (1) NMC ou  $1000 < T < 10000$  anos
  - (2)  $500 < T \leq 1000$  anos
  - (4)  $100 < T \leq 500$  anos

- (10)  $T \leq 100$  anos ou desconhecida
- Altura do Reservatório-AR (H - Metros):
  - (1)  $H \leq 15$  m
  - (2)  $15 < H \leq 30$  m
  - (3)  $30 < H \leq 60$  m
  - (4)  $H > 60$  m
- Comprimento do Reservatório-CR (C – Metros):
  - (1)  $C \leq 200$  m
  - (2)  $200 < C \leq 1000$  m
  - (3)  $1000 < C \leq 2000$  m
  - (4)  $C > 2000$  m
- Tipo de Barragem-TB (Material construtivo principal)
  - (1) Concreto
  - (4) Enrocamento
  - (8) Terra
- Tipo de Fundação-TF (Principal)
  - (2) Rocha
  - (4) Rocha Tratada
  - (8) Aluvião Tratado
  - (10) Aluvião Arenoso
- Idade da Barragem-IB (I - Anos) => Para esta variável, considera-se, observando as estatísticas mundiais, que os primeiros anos correspondem ao maior risco de rompimento das barragens apresentarem um comportamento anormal dos seus elementos.
  - (1)  $I > 30$  anos
  - (2)  $10 < I \leq 30$  anos
  - (3)  $5 < I \leq 10$  anos
  - (4)  $I \leq 5$  anos
- Qualificação Técnica dos Profissionais de Segurança de Barragens-QT
  - (1) Possui Técnico Responsável pela Segurança de Barragem
  - (2) Não possui Técnico Responsável pela Segurança de Barragem
- Relatório de Segurança de Barragem-RS
  - (1) Emite periodicamente o Relatório de Segurança de Barragem
  - (2) Emite o Relatório de Segurança de Barragem sem periodicidade

- (3) Não emite o Relatório de Segurança de Barragem
- Existência de Projeto-EP
  - (1) Completos (Projetos Básico, Executivo, “Como construído” adequados)
  - (3) Parciais (Existem alguns projetos, com informações incompletas)
  - (5) Inexistentes (Não existem projetos)
- Estabilidade de Taludes-ET
  - (1) Inexistente
  - (2) Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo
  - (4) Erosões superficiais, ferrugem exposta, crescimento de vegetação generalizada, tendo necessidade de monitoramento ou atuação corretiva
  - (7) Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança
- Percolação-PE
  - (1) Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem
  - (3) Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizadas e/ou monitoradas
  - (5) Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico
  - (7) Surgência nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras com carreamento de material ou com vazão crescente
- Deformações-DE
  - (1) Inexistente
  - (2) Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo
  - (4) Existência de trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento
  - (6) Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento da segurança
- Confiabilidade das Estruturas Vertedoras-EV

- (1) Estruturas civis e hidroeletromecânicas em pleno funcionamento; canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro (tipo soleira livre) desobstruídos
  - (3) Estruturas civis e hidroeletromecânicas preparadas para a operação, mas sem fontes de suprimento de energia de emergência; canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões ou obstruções, porém sem riscos a estrutura vertente
  - (7) Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação; canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões e/ou parcialmente obstruídos, com risco de comprometimento da estrutura vertente
  - (10) Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas; canais ou vertedouro (tipo soleira livre) obstruídos ou com estruturas danificadas
- Frequência de Avaliação do Comportamento da Barragem-FA
- (1) Adequada - São realizadas inspeções rotineiras, periódicas e formais com emissão de relatórios por meio de inspeções visíveis e instrumentação
  - (3) Razoável - São realizadas inspeções rotineiras, periódicas sem emissão de relatórios
  - (6) Inadequada - Quando as inspeções periódicas não seguem as frequências determinadas; última inspeção formal realizada há mais de cinco anos
  - (10) Nenhuma - Não são realizadas inspeções rotineiras ou periódicas; última inspeção formal realizada há mais de cinco anos
- Condições dos Equipamentos-CE
- (1) Boa
  - (3) Razoável
  - (6) Ruim
  - (10) Inoperantes
- Volume do Reservatório-VR (m<sup>3</sup>)
- (1) Pequeno => VR ≤ 5 milhões m<sup>3</sup>

- (2) Médio => 5 milhões < VR ≤ 75 milhões m<sup>3</sup>
- (4) Grande => 75 milhões < VR ≤ 200 milhões m<sup>3</sup>
- (6) Muito Grande => VR > 200 milhões m<sup>3</sup>
- Impacto Econômico a Jusante-IE
  - (1) Baixo => Sem danos a residências ou despesas < 200 mil
  - (3) Pequeno => Danificadas até 5 casas ou despesas entre 200 mil e 1 milhão
  - (7) Médio => Danificadas de 6 a 49 casas ou despesas entre 1,1 e 10 milhões
  - (10) Grande => Danificadas mais de 50 casas ou despesas > 10 milhões
- Impacto Social a Jusante-IS
  - (1) Baixo => População não é afetada
  - (3) Pequeno => Menos que 100 pessoas afetadas ou perda de capacidade produtiva < 10%
  - (7) Médio => De 100 a 1000 pessoas afetadas ou perda de capacidade produtiva entre 10% e 30%
  - (10) Grande => Mais de 1000 pessoas afetadas ou perda de capacidade produtiva > 30%
- Impacto Ambiental a Jusante-IA
  - (1) Baixo => Área afetada ≤ a 0,1km<sup>2</sup>; duração do impacto ≤ 1 mês e nenhum efeito ecológico
  - (3) Pequeno => 0,1km<sup>2</sup> < área afetada ≤ 1 km<sup>2</sup>; duração do impacto de 1 mês a 1 ano; inundação pode alterar a vegetação sem afetar muito a vida animal
  - (7) Médio => 1km<sup>2</sup> < área afetada ≤ 10 km<sup>2</sup>; duração do impacto de 1 a 10 anos; são afetadas diversas espécies animais
  - (10) Grande => área afetada > 10 km<sup>2</sup>; duração do impacto > 10 anos; importantes efeitos ecológicos
- Custo da Barragem-CB (Custo em relação a outras barragens)
  - (1) Pequeno
  - (3) Médio
  - (5) Grande
- Capacidade de Geração-CG (MW)



- (4) Pequena =>  $1 \leq CG \leq 30$  MW
  - (3) Média =>  $30 < CG \leq 250$  MW
  - (2) Grande =>  $250 < CG \leq 500$  MW
  - (1) Muito Grande =>  $CG > 500$  MW
- **Sistemas de Aviso e Alerta-SA**
- (1) Existente e está automatizado
  - (3) Existente, mas não está automatizado
  - (5) Inexistente

O valor da Periculosidade Potencial ( $PP=VP+AR+CR+TB+TF$ ) conforme equação 2, pode variar de 6 a 36. O valor da Vulnerabilidade Potencial ( $VP=IB+QT+RS+EP+ET+PE+DE+EV+FA+CE$ ) conforme equação 3 pode variar de 10 a 64. O valor do Impacto Potencial ( $IP=VR+IE+IS+IA+CB+CG+SA$ ) conforme equação 4 pode variar de 7 a 50. Portanto, o indicador  $PP+VP$ , que se assemelha à Probabilidade, responsável por medir a chance de ocorrerem problemas estruturais, pode variar de 16 ( $6 + 10$ ) a 100 ( $36 + 64$ ).

A escala foi dividida em duas: uma para tratar os riscos estruturais (Periculosidade Potencial-PP e Vulnerabilidade Potencial-VP) e outra para tratar os riscos à jusante (Impacto Potencial-IP).

A metodologia de análise de riscos para barragens da Eletrobras Furnas foi aplicada em 18 barragens da empresa. A aplicação se deu através do envio e preenchimento da planilha do método pelos especialistas, bem como da análise das fichas técnicas das barragens e das fichas de análise da segurança.

O quadro 14 apresenta as 18 Usinas Hidrelétricas (UHE), bem como o Estado e rio que se localizam, Periculosidade Potencial (PP), Vulnerabilidade Potencial (VP), Impacto Potencial (IP) e o Potencial de Risco (PR) antes da validação da metodologia.

Quadro 14 - Portfólio de barragens – Antes da validação da metodologia (continua)

UHE	Estado	Rio	PP	VP	IP	PR
Baguari	Minas Gerais	Doce	11	12	38	874
Batalha	Minas Gerais / Goiás	São Marcos	18	13	18	558
Corumbá	Goiás	Corumbá	13	11	26	624
Estreito	São Paulo	Tocantins	14	10	50	1200
Foz do Chapecó	Santa Catarina / Rio Grande do Sul	Uruguai	12	19	42	1302
Funil	Rio de Janeiro	Paraíba de	11	13	48	1152

		Sul				
Furnas	Minas Gerais	Grande	14	10	50	1200
Itumbiara	Minas Gerais / Goiás	Paranaíba	12	13	50	1250
Manso	Mato Grosso	Manso	19	11	29	870
Marimbondo	Minas Gerais / São Paulo	Grande	20	10	41	1230
Mascarenhas de Morais	Minas Gerais	Grande	11	13	40	960

Fonte: O autor, 2023.

Quadro 14 - Portfólio de barragens – Antes da validação da metodologia (conclusão)

UHE	Estado	Rio	PP	VP	IP	PR
Peixe Angical	Tocantins	Tocantins	11	11	45	990
Porto Colômbia	Minas Gerais / São Paulo	Grande	18	10	47	1316
Retiro Baixo	Minas Gerais	Paraopeba	17	13	37	1110
Santo Antônio	Rondônia	Madeira	13	13	41	1066
Serra da Mesa	Goiás	Tocantins	14	11	46	1150
Serra do Facão	Goiás	São Marcos	10	10	31	620
Simplício	Minas Gerais / Rio de Janeiro	Paraíba do Sul	12	13	42	1050

Fonte: O autor, 2023.

A primeira verificação foi realizada para as variáveis componentes de PP. As variáveis, altura do reservatório (AR) e comprimento do reservatório (CR) possuem todas uma variação linear de 1, 2, 3 ou 4. As variáveis vazão de projeto (VP) e tipo de fundação (TF) possuem todas uma variação mais acentuada entre seus valores de escala, o que denota que essas duas variáveis estão mais diretamente relacionadas ao perigo do que as duas anteriores, que estão mais diretamente relacionadas ao impacto. A variável tipo de barragem (TB) que a princípio, foi definida como uma escala de maior intensidade para barragens de terra, foi redefinida, para uma abordagem também linear, da mesma maneira que as variáveis AR e CR, pois o tipo de barragem não está relacionado diretamente nem ao perigo e nem ao impacto. Desse modo, a variável TB foi redefinida como: 1-Concreto; 2-Enrocamento; 3-Terra. Conseqüentemente, todas as pontuações de PP foram recalculadas para as 18 barragens.

A segunda verificação foi realizada para as variáveis componentes de VP. A variável idade da barragem (IB), foi redefinida, pois sabe-se que para barragens de aterro (terra/enrocamento) quanto mais antiga, menores os riscos de ruptura e já para as barragens de concreto, se observa o contrário, ou seja, quanto maior a idade, maiores os riscos de ruptura, devido ao envelhecimento dos materiais do concreto e do aço. Desse modo, foi redefinido a seguinte escala para barragens de aterro: 1 para  $IB > 30$  anos; 2 para  $10 < IB \leq 30$  anos; 3 para  $5 < IB \leq 10$  anos; 4 para  $IB \leq 5$  anos. Para barragens de concreto foi redefinida a seguinte escala: 1 para

IB  $\leq$  5 anos; 2 para  $5 < IB \leq 10$  anos; 3 para  $10 < I \leq 30$  anos; 4 para  $I > 30$  anos. As variáveis qualificação técnica dos profissionais de segurança de barragens (QT) e relatório de segurança de barragens (RS) utilizam escalas lineares do tipo “Sim/Não”, isto é, possui (1) ou não (2) técnico qualificado em segurança de barragens; e emite periodicamente (1), emite relatório sem periodicidade (2) ou não emite (3) o relatório de segurança de barragens. As demais variáveis, existência de projeto (EP), instabilidade de taludes (ET), percolação (PE), deformações (DE), confiabilidade das estruturas vertedouros (EV), frequência de avaliação do comportamento da barragem (FA) e condições dos equipamentos (CE) possuem todas uma variação mais acentuada entre seus valores de escala, pois essas variáveis estão mais diretamente relacionadas ao perigo do que as três anteriores, que podem ser perigos, mas que isoladamente por si só, não levariam ao rompimento de uma barragem, ou seja, dependem de outras para acontecer o rompimento.

A terceira verificação foi realizada para as variáveis componentes de IP. A variável volume do reservatório (VR) foi reclassificada, pois as medidas padronizadas por outros métodos não se enquadravam nos volumes dos reservatórios analisados. Dessa maneira, a nova classificação foi definida como: 1- Pequeno para  $VR < 1$  bilhão  $m^3$ ; 2-Médio para  $1 \leq VR < 5$  bilhões  $m^3$ ; 4-Grande para  $5 \leq VR < 10$  bilhões  $m^3$ ; 6-Muito Grande para  $VR \geq 10$  bilhões  $m^3$ . A escala dessa variável acentua-se para um volume de reservatório maior, por conta do maior impacto a jusante, devido ao maior volume de água, em caso de ruptura da barragem. As variáveis impacto econômico, social e ambiental a jusante (IE, IS e IA, respectivamente), possuem todas uma variação mais acentuada entre seus valores de escala, o que denota que essas variáveis estão mais diretamente relacionadas ao impacto. A variável custo da barragem (CB) também foi considerada como impacto potencial (IP) devido ao motivo, de havendo uma ruptura da barragem, que leve à destruição total ou parcial do empreendimento, quanto maior o custo, maior o impacto econômico. Desse modo, a escala dessa variável foi adequada aos valores do investimento (custo) das UHEs em questão. Portanto, a escala foi definida como: 1 para custo pequeno ( $CB < R\$1$  bilhão); 2 para custo médio ( $R\$1 \leq CB < R\$5$  bilhões); 4 para custo alto ( $R\$5 \leq CB < R\$10$  bilhões) e 6 para custo muito alto ( $CB \geq R\$10$  bilhões). A variável capacidade de geração (CG) também foi adaptada à potência das UHEs do presente estudo. Dessa maneira, foi definida como: 1 para

pequena capacidade ( $CG < 150$  MW); 2 para média capacidade ( $150 \leq CG < 500$  MW); 3 para grande capacidade ( $500 \leq CG < 1000$  MW); 4 para muito grande capacidade ( $CG \geq 1000$  MW). Finalmente, a variável sistemas de aviso e alerta (SA) possui escala linear do tipo “Sim/Não”, isto é, possui sistema de aviso e alerta existente e automatizado (1), existente, mas não automatizado (3) ou inexistente (5).

Após a realização de todos os cálculos com os valores das variáveis adaptados ao portfólio de barragens do estudo, resultou no quadro 15.

Quadro 15 - Portfólio de barragens – Após a validação da metodologia

UHE	VARIÁVEIS				CLASSES	
	PP	VP	IP	PR	PP+VP	IP
Baguari	9	12	34	714	C	A
Batalha	13	13	12	312	C	C
Corumbá	11	11	22	484	C	B
Estreito	12	10	45	990	C	A
Foz do Chapecó	10	19	37	1073	C	A
Funil	11	13	39	936	C	A
Furnas	12	10	49	1078	C	A
Itumbiara	12	13	49	1225	C	A
Manso	14	11	23	575	C	B
Marimbondo	15	10	38	950	C	A
Mascarenhas de Moraes	11	13	33	792	C	A
Peixe Angical	11	11	37	814	C	A
Porto Colômbia	13	10	41	943	C	A
Retiro Baixo	12	13	34	850	C	A
Santo Antônio	11	13	42	1008	C	A
Serra da Mesa	12	11	43	989	C	A
Serra do Facão	10	10	26	520	C	B
Simplício	12	13	35	875	C	A

Fonte: O autor, 2023.

Verificando finalmente as duas categorias de classes definidas, PP+VP (correspondente à probabilidade) e IP (correspondente ao impacto), passou-se à validação dessas classes, de acordo com as informações das barragens do estudo.

Após as três verificações realizadas quanto à readequação das variáveis PP, VP e IP, o valor da Periculosidade Potencial (PP) passou a variar de 6 a 31. O valor da Vulnerabilidade Potencial (VP) se manteve de 10 a 64. O valor do Impacto Potencial (IP) passou a variar de 7 a 51. Portanto, o indicador PP+VP, que se assemelha à Probabilidade, responsável por medir a chance de ocorrerem problemas estruturais, pode variar de 16 (6 + 10) a 95 (31 + 64).

Após a definição dos limites inferiores e superiores de cada variável (PP, VP e IP), passou-se a verificar quais as variáveis componentes respectivas de PP e VP podem causar danos estruturais. As variáveis que podem causar danos estruturais são: 1. “Tipo de Fundação-TF” sendo “Aluvião Arenoso” com peso de 10;

2.“Estabilidade de Taludes-ET” sendo “Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança” com peso de 7; 3.“Percolação-PE” sendo “Surgência nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras com carreamento de material ou com vazão crescente” com peso de 7; 4.“Deformações-DE” sendo “Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento da segurança” com peso de 6; 5.“Confiabilidade das Estruturas Vertedoras-EV” sendo “Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação; canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões e/ou parcialmente obstruídos, com risco de comprometimento da estrutura vertente” com peso de 7; 6.“Condições dos Equipamentos-CE” sendo “Ruim” com peso de 6. Portanto para a categoria PP+VP, o limite inferior da faixa crítica (vermelha) será de 43 que é a soma dos pesos das situações mais críticas das 15 variáveis respectivas a PP e VP acrescido dos pesos inferiores das variáveis que não necessariamente causam danos estruturais. Deste modo as seguintes variáveis não necessariamente causam danos estruturais: Vazão de Projeto-VP; Altura do Reservatório-AR; Comprimento do Reservatório-CR; Tipo de Barragem-TB; Idade da Barragem-IB; Qualificação Técnica dos Profissionais de Segurança de Barragens-QT; Relatório de Segurança de Barragem-RS; Existência de Projeto-EP; Frequência de Avaliação do Comportamento da Barragem-FA. Cada uma dessas 9 variáveis possuem o peso mínimo de 1. Portanto, para a categoria PP+VP, o limite inferior da faixa crítica (vermelha) será de  $43 + 9 = 52$ .

O total de todos os piores casos ou situações (cenário pessimista) é de 100 ( $PP=VP+AR+CR+TB+TF$ ) + ( $VP=IB+QT+RS+EP+ET+PE+ DE+EV+FA+CE$ ), somando os piores casos de todas as 15 variáveis. Portanto, a faixa crítica (vermelha) de riscos terá como limite inferior o valor de 52 e superior de 100 para PP+VP.

A faixa de riscos moderados para PP+VP foi definida como as situações de alerta sendo composta das seguintes variáveis e pesos: 1.“Tipo de Fundação-TF” sendo “Aluvião Tratado” com peso de 8; 2.“Estabilidade de Taludes-ET” sendo “Erosões superficiais, ferragem exposta, crescimento de vegetação generalizada, tendo necessidade de monitoramento ou atuação corretiva” com peso de 4; 3.“Percolação-PE” sendo “Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos,

taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico” com peso de 5; 4.“Deformações-DE” sendo “Existência de trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento” com peso de 4; 5.“Confiabilidade das Estruturas Vertedoras-EV” sendo “Estruturas civis e hidroeletrônicas preparadas para a operação, mas sem fontes de suprimento de energia de emergência; canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões ou obstruções, porém sem riscos a estrutura vertente” com peso de 3; 6.“Condições dos Equipamentos-CE” sendo “Razoável” com peso de 3. Portanto para a categoria PP+VP, o limite inferior da faixa de alerta (amarela) será de 27 que é a soma dos pesos das situações de alerta das 15 variáveis respectivas a PP e VP acrescido de 9 que é a soma dos pesos mínimos das 9 variáveis que não causam danos estruturais. Deste modo, o limite inferior da faixa de alerta será de 36 (27 + 9) e o limite superior de 51.

A faixa de riscos baixos (verde) para PP+VP foi definida como as situações de menor perigo variando de 1 a 35. O total de todos os melhores casos ou situações (cenário otimista) é de 16 somando os melhores casos de todas as 15 variáveis.

A matriz de risco utilizada pode ser 3x3 ou 5x5. Uma matriz 5x5 significa ter 5 classes de valores, para a probabilidade e para o impacto. Um exemplo pode ser: probabilidade muita baixa, probabilidade baixa, probabilidade moderada, probabilidade alta e probabilidade muito alta. O mesmo ocorre para o impacto com 5 classes. No entanto, para os respondentes ou entrevistados é difícil ter a noção exata da diferença entre o baixo e muito baixo, assim como o alto e muito alto, pois a diferença é muito tênue entre as duas classes e é difícil conseguir um consenso entre os entrevistados. Obviamente, com uma matriz 5x5, pode haver vieses que seriam incluídos na análise de riscos. Deste modo, optou-se por uma matriz 3x3, com a probabilidade baixa, moderada e alta, com o mesmo raciocínio para o impacto, pois todos os entrevistados sabem a diferença entre alto, moderado e baixo.

Desse modo, para a classe PP+VP, observando-se todos os valores das escalas correspondentes às variáveis, pode-se supor que a classe C (faixa verde), respectiva à normalidade representando riscos estruturais baixos, podendo ser realizadas inspeções de rotina, seja de  $PP+VP \leq 35$ ; a classe B (faixa amarela), respectiva à inspeção no curto prazo, representando riscos estruturais moderados,

significando que podem haver pontos a melhorar, seja de  $36 \leq PP+VP \leq 51$ ; a classe A (faixa vermelha), respectiva à inspeção imediata, representando riscos estruturais altos, podendo existir problemas estruturais graves, seja de  $PP+VP \geq 52$ .

Para a classe IP, verificou-se primeiramente as escalas dos valores das variáveis. Devido ao fato da variável “Volume do Reservatório-VR” “Custo da Barragem-CB” serem variáveis lineares, VR varia de 1 a 4 e CB varia de 1 a 3, isso porque tem o mesmo princípio que a variável capacidade de geração (CG). Ou seja, essas três variáveis estão nessa categoria (Impacto Potencial – IP), pois em caso, de ruptura da barragem, quanto maior o volume do reservatório, maiores podem ser os impactos a jusante, e da mesma maneira, quanto maior o custo e a capacidade de geração, maiores serão os impactos econômicos em caso de ruptura, por conta de sua reconstrução. No entanto, não quer dizer que um custo ou capacidade de geração muito alta de determinada UHE, seja necessariamente classe A, significando danos a jusante altos. Dessa maneira, os valores escalares das variáveis VR e CG, foram definidos como 1, 2, 3 e 4 e a variável CB de 1, 2 e 3. As variáveis impacto econômico, social e ambiental a jusante (IE, IS e IA, respectivamente), comentadas anteriormente, possuem as seguintes classificações: IE possui os valores de 1-Baixo, quando não existir danos a residências ou despesas para reconstrução menores que R\$ 200 mil; 3-Pequeno, quando forem danificadas até 5 casas ou despesas entre R\$ 200 mil e R\$1 milhão; 7-Médio, quando forem danificadas de 6 a 49 casas ou despesas entre R\$ 1 e R\$10 milhões; 10-Grande, quando forem danificadas mais de 50 casas ou despesas maiores que R\$10 milhões. A variável IS possui os valores de 1-Baixo, quando a população não é afetada; 3-Pequeno, quando menos que 100 pessoas forem afetadas ou houver perda de capacidade produtiva de até 10%; 7-Médio, quando forem afetadas de 100 a 1000 pessoas ou houver perda de capacidade produtiva entre 10% e 30%; 10-Grande, quando mais de 1000 pessoas forem afetadas ou houver perda de capacidade produtiva maior que 30%. A variável impacto ambiental (IA), possui os valores de 1-Baixo, quando a área afetada for menor que 0,1 km<sup>2</sup> ou a duração do impacto for menor que um mês e não acontecer efeito ecológico; 3-Pequeno, quando a área afetada estiver entre 0,1 e 1 km<sup>2</sup> ou a duração do impacto for de um mês a um ano ou quando a inundação alterar a vegetação sem afetar muito a vida animal; 7-Médio, quando a área afetada estiver entre 1 e 10 km<sup>2</sup> ou a duração do impacto for de um a dez anos ou forem afetadas diversas espécies animais; 10-

Grande, quando a área afetada for maior que 10 km<sup>2</sup> ou a duração do impacto for maior que 10 anos ou quando acontecerem importantes efeitos ecológicos. A última variável dessa categoria, sistemas de aviso e alerta (SA) também possui uma escala de valores que se acentua para os valores negativos, como já comentado anteriormente.

Para a variável Impacto Potencial (IP), procedeu-se ao mesmo raciocínio empregado para PP+VP. As variáveis que podem causar impactos catastróficos são: 1.“Volume do Reservatório-VR” sendo “Muito Grande-VR > 200 milhões m<sup>3</sup>” com peso de 4; 2.“Impacto Econômico a Jusante-IE” sendo “Grande-Danificadas mais de 50 casas ou despesas > 10 milhões” com peso de 10; 3.“Impacto Social a Jusante-IS” sendo “Grande-Mais de 1000 pessoas afetadas ou perda de capacidade produtiva > 30%” com peso de 10; 4.“Impacto Ambiental a Jusante-IA” sendo “Grande-área afetada > 10 km<sup>2</sup>; duração do impacto > 10 anos; importantes efeitos ecológicos” com peso de 10; 5.“Sistemas de Aviso e Alerta-SA” sendo “Inexistente” com peso de 5. Portanto para a categoria IP, o limite inferior da faixa crítica (vermelha) será de 39 que é a soma dos pesos das situações mais críticas das 7 variáveis respectivas a IP acrescido dos pesos inferiores das variáveis que não necessariamente causam impactos. Deste modo as seguintes variáveis não necessariamente causam impactos: Custo da Barragem-CB; Capacidade de Geração-CG. Cada uma dessas duas variáveis possuem o peso mínimo de 1. Portanto, para a categoria IP, o limite inferior da faixa crítica (vermelha) será de 39 + 2 = 41.

A faixa de riscos moderados foi definida como as situações de alerta sendo composta das seguintes variáveis e pesos: 1.“Volume do Reservatório-VR” sendo “Médio-5 milhões < VR ≤ 75 milhões m<sup>3</sup>” com peso de 2; 2.“Impacto Econômico a Jusante-IE” sendo “Médio-Danificadas de 6 a 49 casas ou despesas entre 1,1 e 10 milhões” com peso de 7; 3.“Impacto Social a Jusante-IS” sendo “Médio-De 100 a 1000 pessoas afetadas ou perda de capacidade produtiva entre 10% e 30%” com peso de 7; 4.“Impacto Ambiental a Jusante-IA” sendo “Médio-1km<sup>2</sup> < área afetada ≤ 10 km<sup>2</sup>; duração do impacto de 1 a 10 anos; são afetadas diversas espécies animais” com peso de 7; 5.“Sistemas de Aviso e Alerta-SA” sendo “Existente, mas não está automatizado” com peso de 3. Portanto, para a categoria IP, o limite inferior da faixa de alerta (amarela) será de 26 que é a soma dos pesos das situações de alerta das 7 variáveis respectivas a IP acrescido de 2 que é a soma dos pesos



mínimos das 2 variáveis que não causam danos estruturais. Deste modo, o limite inferior da faixa de alerta será de 28 ( $26 + 2$ ) e o limite superior de 40.

A faixa de riscos baixos (verde) foi definida como as situações de menor perigo variando de 1 a 27. O total de todos os melhores casos ou situações (cenário otimista) é de 7 somando os melhores casos de todas as 7 variáveis.

Desse modo, para a classe IP, observando-se todos os valores das escalas readequadas às variáveis, pode-se supor que a classe C, respectiva a impactos baixos podendo ser realizadas inspeções bianuais, seja de  $IP \leq 27$ ; a classe B, respectiva a impactos médios podendo ser realizadas inspeções anuais, seja de  $28 \leq IP \leq 40$ ; a classe A, respectiva a impactos que podem ser elevados, se houver ruptura da barragem, seja de  $IP \geq 41$ .

Após a realização de todos os cálculos para as classes PP+VP e IP, adaptadas ao portfólio de barragens do estudo, foi elaborado o quadro 16 que apresenta a análise de riscos do portfólio de barragens, em ordem decrescente do potencial de risco (PR).

Quadro 16 - Portfólio de barragens ordenado por Potencial de Risco

UHE	VARIÁVEIS				CLASSES	
	PP	VP	IP	PR	PP+VP	IP
Itumbiara	12	13	46	1150	C	A
Foz do Chapecó	10	19	37	1073	C	A
Furnas	12	10	46	1012	C	A
Estreito	12	10	44	968	C	A
Porto Colômbia	13	10	41	943	C	A
Santo Antônio	10	13	41	943	C	A
Serra da Mesa	12	11	41	943	C	A
Funil	11	13	39	936	C	A
Marimbondo	15	10	36	900	C	B
Simplício	12	13	36	900	C	B
Retiro Baixo	12	13	34	850	C	B
Peixe Angical	11	11	36	792	C	B
Mascarenhas de Morais	11	13	33	792	C	B
Baguari	9	12	34	714	C	B
Manso	14	11	23	575	C	B
Serra do Facão	10	10	25	500	C	B
Corumbá	11	11	22	484	C	C
Batalha	13	13	12	312	C	C

Fonte: O autor, 2023.

Concluindo, verifica-se que, quanto ao aspecto estrutural e de segurança das barragens, todas são classe C (verde), o que denota que as técnicas e métodos de segurança são efetivos. Verifica-se também, que os impactos econômicos, sociais e ambientais, em caso de ruptura das barragens, podem ser catastróficos, razão pela

qual, deve-se sempre monitorar e auscultar as barragens periodicamente, e manter um planejamento de modernização contínua do parque hidroelétrico da empresa.

Como consequência, a escala (PP+VP) foi segmentada em três classes, conforme o quadro 17.

Quadro 17 - Classes PP + VP

CLASSE	PP + VP	SIGNIFICADO
A (Inspeção Imediata)	$PP + VP \geq 52$	Podem existir problemas estruturais
B (Inspeção no Curto Prazo)	$36 \leq PP + VP \leq 51$	Podem existir alguns pontos a melhorar
C (Normalidade)	$PP + VP \leq 35$	Inspeção de rotina

Fonte: O Autor, 2023.

A escala IP também foi segmentada em três classes, conforme quadro 18.

Quadro 18 - Classes IP

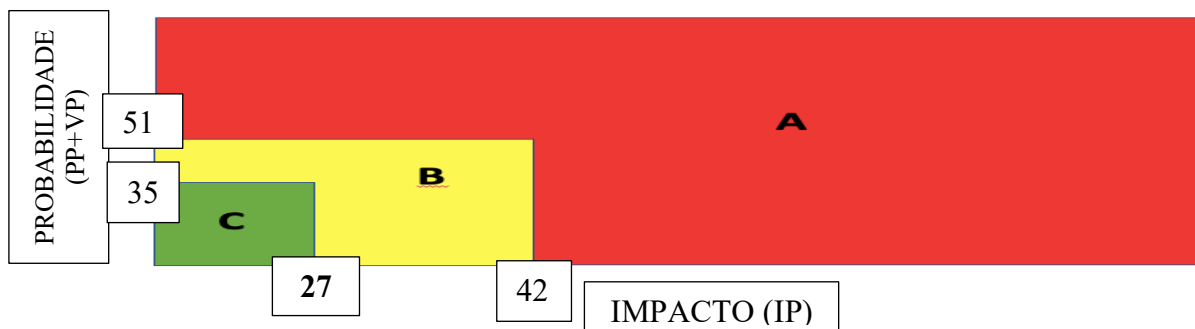
CLASSE	IP	SIGNIFICADO
A (Se houver ruptura da barragem, os danos à jusante podem ser elevados)	$IP \geq 43$	Inspeções semestrais (barragens com Dano a Jusante alto, independente do Risco)
B (Danos e Riscos moderados)	$28 \leq IP \leq 42$	Inspeções Anuais
C (Danos e Riscos baixos)	$IP \leq 27$	Inspeções Bianaais

Fonte: O Autor, 2023.

A matriz de riscos representa a medida da probabilidade da ocorrência dos riscos e a medida do impacto social, econômico e ambiental dos riscos quando estes acontecem. Na matriz são definidas três categorias de riscos: classe “A” para riscos baixos, “B” para riscos moderados e “C” para riscos altos.

A figura 27 resume a distribuição dos riscos associados às barragens da Metodologia de Análise de Riscos da Eletrobras Furnas, definindo três classes de barragens (A, B e C), que, por sua vez, estabelecem os níveis de monitoramento das mesmas e os respectivos valores. A probabilidade (PP + VP) até 35 e impacto (IP) até 27 são riscos baixos classe C (verde). A probabilidade (PP + VP) de 36 até 51 e impacto (IP) de 28 até 42 são riscos moderados classe B (amarelo). A probabilidade (PP + VP) maior que 52 e impacto (IP) maior que 42 são riscos altos classe A (vermelho).

Figura 27 - Matriz de riscos da Metodologia de Análise de Riscos de Barragens da Eletrobras Furnas



Fonte: O autor, 2023.

O detalhamento das ações que devem ser tomadas a fim de que seja mensurado o potencial de risco pode ser definido como a seguinte sequência: Probabilidade Baixa = 1; Probabilidade Média = 2 e Probabilidade Alta = 3 assim como Impacto Baixo = 1; Impacto Médio = 2 e Impacto Alto = 3. Esta é uma maneira simples de tentar transformar a análise qualitativa em quantitativa. Portanto, o Risco que é a multiplicação da Probabilidade pelo Impacto será definido como Risco Baixo variando de 1 a 2; Risco Médio variando de 3 a 5 e Risco Alto variando de 6 a 9. Deste modo, para Probabilidade Baixa (1) com Impacto Baixo (1); o Risco é Baixo ( $1 \times 1 = 1$ ); Probabilidade Média (2) com Impacto Baixo (1); o Risco é Baixo ( $2 \times 1 = 2$ ); Probabilidade Alta (3) com Impacto Baixo (1); o Risco é Médio ( $3 \times 1 = 3$ ); Probabilidade Baixa (1) com Impacto Médio (2); o Risco é Baixo ( $1 \times 2 = 2$ ); Probabilidade Média (2) com Impacto Médio (2); o Risco é Médio ( $2 \times 2 = 4$ ); Probabilidade Alta (3) com Impacto Médio (2); o Risco é Alto ( $3 \times 2 = 6$ ); Probabilidade Baixa (1) com Impacto Alto (3); o Risco é Médio ( $1 \times 3 = 3$ ); Probabilidade Média (2) com Impacto Alto (3); o Risco é Alto ( $2 \times 3 = 6$ ); Probabilidade Alta (3) com Impacto Alto (3); o Risco é Alto ( $3 \times 3 = 9$ ).

O quadro 19 apresenta o resumo final das classes, suas faixas e significados.

Quadro 19 - Classes, faixas e significados da MARR

P (1, 2, 3)	I (1, 2, 3)	Risco (P x I)	Probabilidade (PP + VP)	Impacto (IP)	Risco (PP + VP) x IP
Baixa (1)	Baixo (1)	Baixo (1)	Baixa (PP + VP ≤ 35)	Baixo (IP ≤ 27)	Baixo
Média (2)	Baixo (1)	Baixo (2)	Média (36 ≤ PP + VP ≤ 51)	Baixo (IP ≤ 27)	Baixo
Alta (3)	Baixo (1)	Médio (3)	Alta (PP + VP ≥ 52)	Baixo (IP ≤ 27)	Médio
Baixa (1)	Médio (2)	Baixo (2)	Baixa (PP + VP ≤ 35)	Médio (28 ≤ IP ≤ 42)	Baixo
Média (2)	Médio (2)	Médio (4)	Média (36 ≤ PP + VP ≤ 51)	Médio (28 ≤ IP ≤ 42)	Médio
Alta (3)	Médio (2)	Alto (6)	Alta (PP + VP ≥ 52)	Médio (28 ≤ IP ≤ 42)	Alto
Baixa (1)	Alto (3)	Médio (3)	Baixa (PP + VP ≤ 35)	Alto (IP ≥ 43)	Médio

Média (2)	Alto (3)	Alto (6)	Média ( $36 \leq PP + VP \leq 51$ )	Alto ( $IP \geq 43$ )	Alto
Alta (3)	Alto (3)	Alto (9)	Alta ( $PP + VP \geq 52$ )	Alto ( $IP \geq 43$ )	Alto
RISCO ( $PP + VP$ ) x IP		SIGNIFICADO			
Baixo		Situação Normal - Possibilidade baixa de ocorrência de danos estruturais Podem ser realizadas inspeções bianuais			
Médio		Situação de Alerta - Podem existir problemas estruturais que devem ser investigados; Devem ser realizadas inspeções anuais			
Alto		Situação Crítica – Podem existir problemas estruturais mais graves; Investigação imediata; Inspeções semestrais			

Fonte: O autor, 2023.

A Metodologia de Análise de Riscos de Barragens foi definida a fim de, observando as exigências das Leis 12.334:2010 e 14.066:2020 (Lei de Segurança de Barragens), e dos diversos trabalhos de autores nacionais e internacionais, servir como um dos pilares para a construção da MARR que será baseada nas definições da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH).

Este capítulo descreveu a metodologia de avaliação para segurança de barragens da Eletrobras Furnas. O próximo capítulo descreve os resultados.

## 8 RESULTADOS

Os resultados apresentam os frameworks utilizados na identificação dos diversos riscos que podem impactar os reservatórios, para servirem de base para a construção da MARR.

Foram desenvolvidos três frameworks utilizando diagramas de causa e efeito Ishikawa, para ruptura de barragem, sendo o primeiro para causas internas e externas, o segundo para causas de problemas estruturais e o terceiro para avaliação do risco hidrológico com impacto de um galgamento. Foram elaborados dois frameworks ETA para cálculo da probabilidade de ruptura, um para erosão por galgamento sem instrumentação e outro com instrumentação. Também foi desenvolvida uma FMECA para enquadramento do nível do pH.

A figura 28 apresenta o diagrama de causa e efeito Ishikawa para o risco da ruptura de uma barragem, principalmente considerando causas internas (I) e externas (E). As causas da ruptura foram divididas em oito: induzidas (E), externas (E), internas à estrutura da barragem (I), internas pelas fundações e ombreiras (I), operacionais (E), estruturas auxiliares (I), intrínsecas de projeto e construção (E) e de envelhecimento (E). Para cada causa existem sub causas possíveis. As causas induzidas podem ser ocasionadas por impactos de aviões e outros, explosões, vandalismo e terrorismo. As causas externas podem ser oriundas por galgamento, perda da proteção superficial do talude, instabilidade de encostas, abalos sísmicos e cheias. As causas internas à estrutura da barragem podem ser ocasionadas por instabilidade e escorregamentos, buracos de animais, percolação, erosão interna, deformações e recalques, liquefação, crescimento da vegetação, pressões e obstrução da drenagem. As causas internas pelas fundações e ombreiras podem ser oriundas de instabilidade e escorregamentos, erosão interna, deformações e recalques, interface barragem/fundação, pressões elevadas, liquefação e buracos de animais. As causas operacionais podem ser ocasionadas por monitoramento e manutenção inadequados, falha de operação por erro humano e obstrução de vertedouros. As causas das falhas nas estruturas auxiliares podem ser oriundas de instabilidade por cavitação ou abrasão do concreto, tensões e fissuras, deformações e pressões. As causas de falhas intrínsecas por projeto ou construção podem ser ocasionadas por subdimensionamento ou não detalhamento do projeto,

levantamento inadequado do estudo do AHE durante a concepção e por construção ou materiais inadequados. Os efeitos do envelhecimento podem ser oriundos de deterioração dos materiais e componentes, solos e rochas e por efeito térmico.

Figura 28 - Diagrama Ishikawa para riscos internos e externos

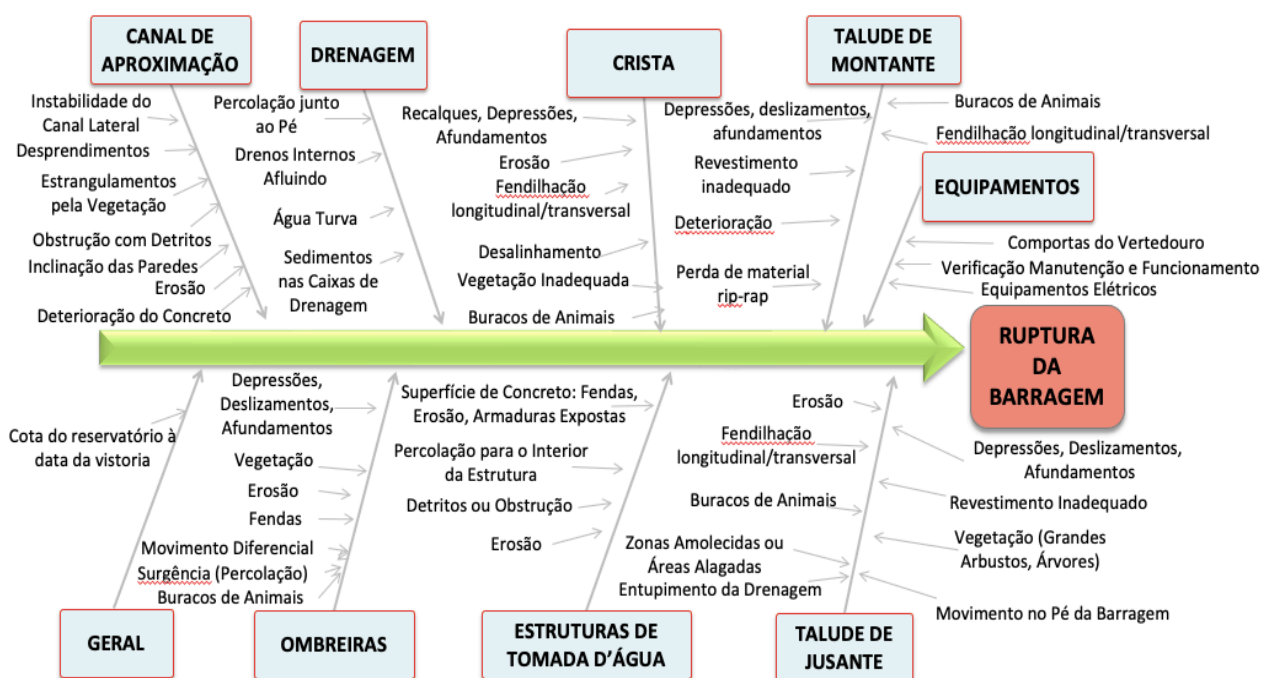


Fonte: Adaptado de Hughes *et al.* (2000); CDA (2007); Caldeira (2008).

A figura 29 apresenta o diagrama de causa e efeito Ishikawa para o risco da ruptura de uma barragem, principalmente considerando causas estruturais. As causas da ruptura foram divididas em nove: canal de aproximação, drenagem, crista, talude de montante, equipamentos, geral, ombreiras, estruturas de tomada d'água e talude de jusante. As causas de ruptura relativas ao canal de aproximação podem ser instabilidade do canal lateral, desprendimentos, estrangulamentos pela vegetação, obstrução com detritos, inclinação das paredes, erosão e deterioração do concreto. As causas de ruptura relativas à drenagem podem ser percolação junto ao pé, drenos internos afluindo, água turva e sedimentos nas caixas de drenagem. As causas de ruptura relativas à crista podem ser recalques, depressões e afundamentos, erosão, fendilhação, desalinhamento, vegetação inadequada e buracos de animais. As causas de ruptura relativas ao talude de montante podem ser depressões e afundamentos, revestimento inadequado, deterioração e perda de

material do rip-rap. As causas de ruptura relativas aos equipamentos podem ser comportas do vertedouro, manutenção e funcionamento e equipamentos elétricos. As causas de ruptura gerais podem ser cota do reservatório na data da vistoria. As causas de ruptura relativas às ombreiras podem ser depressões, deslizamentos e afundamentos, vegetação, erosão, fendas, movimento diferencial, surgência por percolação e buracos de animais. As causas de ruptura relativas às estruturas de tomada d'água podem ser superfície de concreto com fendas, erosão e armaduras expostas, percolação para o interior da estrutura, detritos ou obstrução e erosão. As causas de ruptura relativas ao talude de jusante podem ser erosão, fendilhação, buracos de animais, zonas amolecidas ou áreas alagadas, entupimento da drenagem, depressões, deslizamentos e afundamentos, revestimento inadequado, vegetação de grandes arbustos ou árvores e movimentação no pé da barragem.

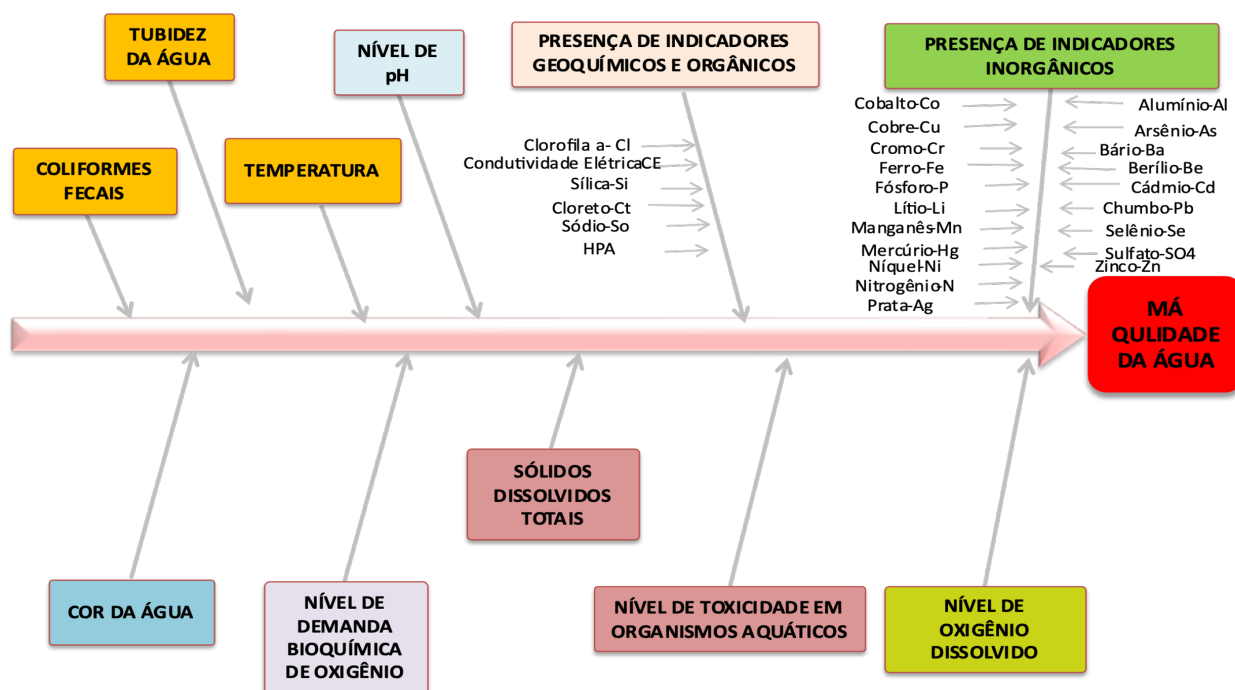
Figura 29 - Diagrama Ishikawa para riscos estruturais



Fonte: Adaptado de ANA (2017).

A figura 30 apresenta um diagrama de Ishikawa para a “má qualidade da água”, que dentre outras, podem ser causadas por coliformes fecais, turbidez da água, temperatura, nível de pH, presença de indicadores geoquímicos e orgânicos, presença de indicadores inorgânicos, cor da água, nível de demanda bioquímica de oxigênio, nível de oxigênio dissolvido, sólidos dissolvidos totais e nível de toxicidade em organismos aquáticos.

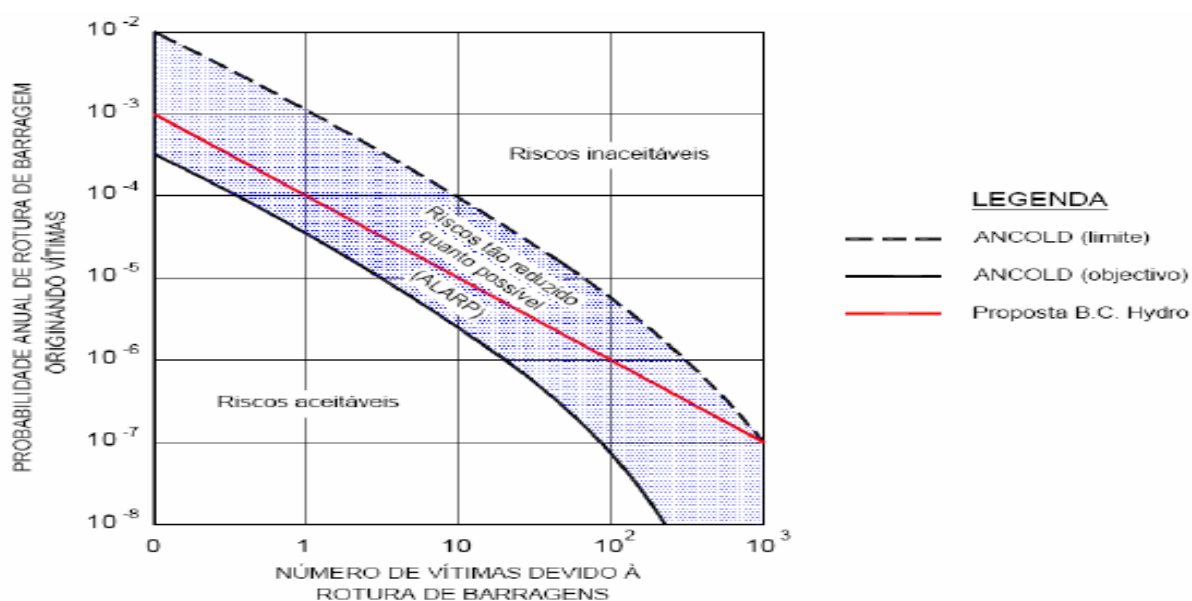
Figura 30 - Diagrama Ishikawa para riscos da má qualidade da água



Fonte: O autor, 2023.

Os riscos sociais ou que impactam a sociedade são calculados por curvas F-N, definidas, onde “F” representa a frequência acumulada por barragem e por ano ou probabilidade anual de ruptura e “N” representa o número mínimo esperado de vítimas (PINTO, 2008). A figura 31 apresenta em escala logarítmica, os critérios propostos pela ANCOLD (1994) e BC Hydro (1993).

Figura 31 - Critérios propostos para a curva F-N



Fonte: ANCOLD (1994); BC Hydro (1993).



O valor da probabilidade anual de ruptura aceitável é de  $10^{-6}$ /pessoa.ano. As faixas de valores menores ( $10^{-7}$  e  $10^{-8}$ ) representam valores de bom e ótimo desempenho e as faixas de valores maiores ( $10^{-4}$  e  $10^{-5}$ ) representam valores de alerta e, portanto, preocupantes com relação aos riscos que possam ocorrer. O quadro 20 apresenta estas definições do nível de aceitabilidade de ruptura de barragem.

Quadro 20 - Nível de aceitabilidade de ruptura de barragem

Probabilidade anual de ruptura (Por pessoa por ano)	Avaliação de risco
$10^{-4}$	Muito Preocupante
$10^{-5}$	Preocupante
$10^{-6}$	Aceitável
$10^{-7}$	Bom Desempenho
$10^{-8}$	Ótimo Desempenho

Fonte: Adaptado de ANCOLD (1994); BC Hydro (1993).

Estes resultados corroboram os de Morris *et al.* (1999), definindo  $10^{-6}$ /pessoa.ano, como aceitável para o risco societal. Nas pesquisas sobre taxas de falhas de barragens realizadas por Almeida *et al.* (2003), constatou-se que são de  $1,0 \times 10^{-5}$  para as em arco,  $9,1 \times 10^{-5}$  para barragens de concreto gravidade,  $1,9 \times 10^{-4}$  para as de terra,  $2,7 \times 10^{-4}$  para as de contraforte,  $5,2 \times 10^{-4}$  para as de enrocamento. Deste modo, definiu-se a faixa de aceitabilidade de  $10^{-6}$ /pessoa.ano como conservadora, representando o pior cenário comparado aos estudos de Almeida *et al.* (2003).

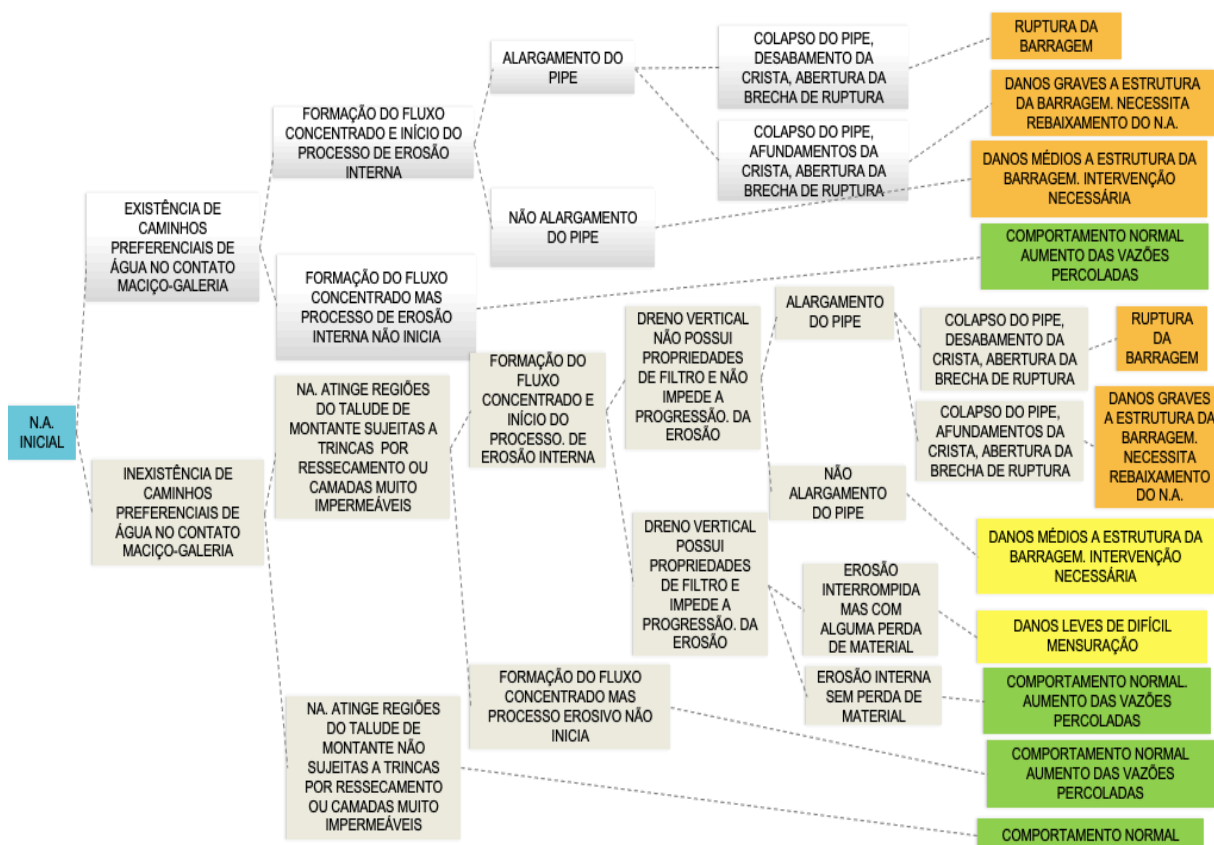
Os cenários mais críticos para segurança das barragens são determinados após a definição do nível de aceitabilidade. Esses cenários podem ser ocasionados por condições hidrológicas ou hidráulicas, geotécnicos e geológicos, dentre outros, podendo ter diversas consequências como galgamento da barragem, escorregamento através da interface concreto-rocha, erosão interna através da interface solo-concreto, erosão interna pela fundação, rompimento da adutora por corrosão, dentre outras.

O risco hidrológico foi analisado com a consequência de um eventual galgamento, tendo como causa uma cheia máxima provável, uma cheia decamilenar ou um escorregamento de taludes na área do reservatório.

A figura 32 apresenta a ferramenta de Análise de Árvore de Eventos (ETA) para a probabilidade de ocorrência do *piping*. A leitura do ETA deve ser realizada da

esquerda para a direita. Para cada nó da árvore, pode haver uma probabilidade de ocorrência associada. A primeira verificação a ser realizada é quanto à existência ou não de caminhos preferenciais para a água. No caso de haver caminho preferencial, verifica-se a formação do fluxo concentrado e inicia ou não o processo de erosão interna, podendo haver alargamento ou não do *pipe* com conseqüente colapso do *pipe* com desabamento ou afundamento da crista, podendo ocasionar a ruptura da barragem em última instância ou danos graves ou médios à estrutura. As cores amarelas do ETA significam danos graves, médios ou leves à estrutura e as cores verdes representam o comportamento normal da estrutura e aumento das vazões percoladas.

Figura 32 - ETA para a probabilidade de ocorrência do piping



Fonte: Adaptado de Perini (2009).

A figura 33 (Árvore de Eventos I) apresenta a árvore de evento (ETA) elaborada para a simulação de um eventual galgamento considerando uma barragem sem instrumentação. No exemplo, considerou-se que as estruturas de concreto têm boa resistência ao galgamento, sendo apoiadas sobre rochas de boa

consistência. Foi assumido o valor de  $10^{-7}$ , como probabilidade anual de ruptura de barragem com bom desempenho, conforme definido no quadro 20. A simulação foi realizada com duas alternativas, sendo estimada a influência da probabilidade de detecção antecipada da cheia. Nessa situação, a probabilidade de detecção da cheia foi baixa (10%), devido a não existência de instrumentação. Nas figuras, o símbolo “F” significa “Falha” e “S” é a possibilidade de “Sucesso”. As probabilidades das figuras 33 e 34 foram definidas de acordo com diversos projetos desenvolvidos na empresa.

Figura 33 - Árvore de eventos I – Erosão por galgamento (sem instrumentação)



A figura 34 (Árvore de Eventos II) apresenta a árvore de evento (ETA) elaborada para galgamento, considerando a existência de sistema de instrumentação, existindo a possibilidade alta de detecção antecipada da cheia (90%).

Figura 34 - Árvore de eventos I – Erosão por galgamento (com instrumentação)



Fonte: Adaptado de Silveira e Machado (2005).

Para análise de uma das variáveis da MARR, foi elaborada a Análise dos Modos de Falha, seus Efeitos e Severidade (FMECA). O quadro 21 apresenta a FMECA para o pH.

O quadro 21 apresenta os valores resumidos baseados nos quadros 10, 11 e 12.

Quadro 21 - Classes de severidade, probabilidade e impacto

Probabilidade	Classe	Impacto	Classe	Severidade	Classe
1	Improvável	1	Sem impacto	I	Baixa
2	Remota	2	Pequeno	II	Média
4	Ocasional	4	Moderado	III	Média a Alta
7	Provável	6	Alto	IV	Alta
10	Frequente	9	Significativo	V	Muito Alta
		10	Catastrófico	VI	Massiva

Fonte: Adaptado de Santos (2006); Hartford e Baecher (2004); Robertson *et al.* (2003).

O risco será a multiplicação da probabilidade, pelo impacto e pela severidade. Portanto, no quadro 22, o risco será  $7 \times 6 \times 5 = 210$ . Segundo o quadro 21, o valor máximo para a probabilidade é 10, para o impacto é 10 e para a severidade é 6. Portanto, o máximo possível é 600 ( $10 \times 10 \times 6$ ). Deste modo, a FMECA do pH (quadro 22) tem o valor relativo de  $210/600 = 35\%$  o que é considerado um risco moderado.

Quadro 22 - FMECA para o pH

Causas	Modo de Falha	Efeitos	Probabilidade	Impacto	Severidade	Meios de Detecção
Nível do pH fora do preconizado pela CONAMA 357:2005 (6 a 9), por exemplo, elevada atividade fotossintética (floração de algas)	pH > 7	Aumento do grau de alcalinidade	D Provável=7 (10 a 20%) Quadro 9	IV Média=6 Quadro 10	V = 5 Significativa Quadro 8	1. Algumas substâncias têm seus efeitos tóxicos atenuados ou magnificados em pHs extremos, como aquelas presentes em despejos de produtos químicos 2. No caso do despejo de soda, há formação de óxido de cálcio, provocando corrosão do epitélio branquial e das nadadeiras levando os peixes à morte 3. A amônia em pH > 9 e altas temperaturas tende a ser tóxica 4. pH > 10 são letais para a maioria dos peixes
	pH < 7	Aumento do grau de acidez				1. No caso de despejo de ácidos, os peixes apresentam maior frequência respiratória 2. Em pH muito baixo, os peixes têm morte imediata 3. Alguns metais em pH < 4 têm maior toxicidade

Fonte: O autor, 2023.

Neste capítulo foram desenvolvidos os frameworks de diagramas de causa e efeito Ishikawa, ETA e FMECA. O próximo capítulo descreve a MARR.

## 9 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE RISCOS PARA RESERVATÓRIOS (MARR)

Este capítulo trata do desenvolvimento da MARR.

Segundo a OCDE (2013), corroborado pelo Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS, 2015), define-se risco hídrico como o risco ao suprimento de água para atender as demandas de curto e longo prazos, incluindo riscos associados a secas ou inundações, baixa qualidade para os usos pretendidos, comprometimento dos sistemas e ecossistemas aquáticos, quando a pressão ultrapassa sua capacidade de resposta ou resiliência.

Portanto, a MARR pode auxiliar principalmente quanto à qualidade para os usos pretendidos e o comprometimento dos sistemas e ecossistemas aquáticos.

Segundo Tundisi (2014), os principais impactos nas bacias hidrográficas e suas consequências nos recursos hídricos são a biodiversidade aquática, os custos do tratamento e a perda dos serviços dos ecossistemas aquáticos, afetando a economia regional, a saúde humana, a disponibilidade hídrica e a perda de serviços ecossistêmicos.

A nível mundial existem cerca de 39 milhões de compostos orgânicos e inorgânicos registados no *Chemical Abstracts Service* (CAS), a maior base de dados a nível mundial sobre substâncias químicas (CONSUMER PRODUCTS SAFETY & QUALITY, 2023).

Devido a quantidade muito grande de variáveis que podem mensurar a qualidade e quantidade de água, fez-se uma pesquisa exaustiva em artigos, métodos, manuais de instituições e entidades nacionais e internacionais, bem como também foram pesquisadas dissertações de mestrado e teses de doutorado de universidades, com o objetivo de decidir quais as variáveis serão incluídas na metodologia. O quadro 23 apresenta as pesquisas que de algum modo, incluíam substâncias caracterizadas e estudadas em determinado recurso hídrico. No quadro, foram definidos “I” como Identificador, “Documento” como o título do documento e “Variável” como as variáveis que foram incluídas no respectivo estudo ou pesquisa.

Quadro 23 - Documentos pesquisados para decisão das variáveis incluídas

I	Documento	Variáveis incluídas no estudo/pesquisa
D1	ANA (2005). Índice de Qualidade das Águas (IQA)	Oxigênio dissolvido (OD), coliformes fecais, potencial hidrogeniônico (pH), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), temperatura, nitrogênio total, fósforo total, turbidez e resíduo total
D2	PERKINELMER (2021)	Compostos orgânicos voláteis (carbono, metano, gás causador do efeito estufa), arsênio, cobre, cromo, níquel, prata, selênio, mercúrio)
D3	ROCHA (2021)	Cor, sabor, odor, turbidez, temperatura, pressão, presença de sais, solventes, dureza, pH, radioatividade, OD, DBO, compostos orgânicos, metais, nitrato, nitrogênio amoniacal, fósforo total, escherichia coli, nitrito, ferro solúvel, alumínio solúvel
D4	PASTRO <i>et al.</i> (2020)	Coliformes totais e termotolerantes; OD; nitrogênio total; turbidez; temperatura; pH; DBO; condutividade elétrica (CE); sólidos totais (ST); sólidos dissolvidos (SD); sólidos suspensos (SS); e os metais cálcio, magnésio e ferro
D5	ANA (2020)	Turbidez, sedimentos
D6	ANA (2021)	DBO
D7	SAKIS <i>et al.</i> (2019)	pH, condutividade elétrica, OD, temperatura, turbidez, sólidos totais dissolvidos
D8	REBELO (2009)	Hidrocarbonetos totais, benzeno, fluoranteno, naftaleno, antraceno
D9	TUNDISI (2014)	Metais tóxicos (Mercúrio, chumbo e cádmio), poluentes orgânicos persistentes (POPs) dissolvidos, temperatura
D10	BRASIL. CONAMA 357 (2005)	Clorofila, cianobactérias, sólidos dissolvidos, alumínio, antimônio, arsênio, bário, berílio, boro, cádmio, chumbo, cianeto, cloreto, cloro, cobalto, cobre, cromo, ferro, fluoreto, fósforo, lítio, manganês, mercúrio, níquel, nitrato, nitrito, nitrogênio, prata, selênio, sulfato, sulfeto, urânio, vanádio, zinco, dentre outros
D11	CALIFORNIA WATER BOARDS (2020)	Coliformes totais, escherichia coli
D12	ALMEIDA (2021) citando Horton (1965)	Condutividade elétrica, cloretos, alcalinidade, extrato de clorofórmio de carbono, coliformes, OD, tratamento de esgoto, pH
D13	ALMEIDA (2021) citando o Índice de Brown (1970)	Lista iniciou com 35 parâmetros e após diversas interações com pesquisadores, chegou-se à uma lista de 11 parâmetros (OD, coliformes fecais, pH, DBO, nitrato, fosfato, temperatura, turbidez, sólidos totais)
D14	ALMEIDA (2021) citando o Índice de Numerow (NUMEROW; SUMITOMO, 1971)	OD, pH, temperatura, cor, turbidez, coliformes fecais, sólidos dissolvidos totais, sólidos suspensos, nitrogênio total, alcalinidade, dureza, cloreto, ferro e magnésio, sulfato
D15	ALMEIDA (2021) citando o Índice de Prati (PRATI; PAVANELLO; PESARIN, 1971)	pH, OD, DBO, DQO, Sólidos suspensos, NH <sub>3</sub> , NO <sub>3</sub> , Cloretos, Ferro, Manganês, ABS, CCE
D16	ALMEIDA (2021) citando o Índice de Dinis (1987)	Coliformes totais, OD, DBO, escherichia coli, alcalinidade, dureza, cloreto, condutividade, pH, nitrato, temperatura, cor
D17	CETESB (2022a), IQA CETESB	OD, coliformes fecais, pH, DBO, temperatura, nitrogênio, fósforo, turbidez

Fonte: O autor, 2023.

Uma das maneiras utilizadas para a seleção dos parâmetros é a consulta a especialistas, onde os pesquisadores selecionam os parâmetros que julgam serem os mais significativos, as respostas são tabuladas e um número limitado de parâmetros é selecionado, de modo a garantir a praticidade e representatividade da escolha (ALMEIDA, 2021).

Do quadro 23, percebe-se que as seis variáveis mais utilizadas pelos 17 métodos referenciados foram OD, pH, temperatura, DBO, coliformes fecais e turbidez. As outras variáveis foram utilizadas em um menor número de métodos. Portanto, estas seis variáveis estão incluídas na MARR.

Na MARR foram definidos quatro pilares: 1.Quantidade de água; 2.Qualidade de água; 3.Existência de sistema de comunicação e de tratamento de esgoto; 4.Impacto a jusante. Para cada um dos pilares, foram definidas as seguintes variáveis:

- a) Quantidade de água mensurada pela: altura do nível d'água (ANA), velocidade do rio (VER), assoreamento ou acúmulo de sedimentos (ASS), estabilidade de taludes (EST), volume do reservatório (VOL);
- b) Qualidade da água mensurada pelo: nível de toxicidade em organismos aquáticos (NTO), turbidez da água (TUA), nível de pH (NPH), cor da água (COA), presença de indicadores geoquímicos, orgânicos e inorgânicos (PIGOI), nível de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nível de oxigênio dissolvido (NOD), coliformes fecais (COF), temperatura (TEM), sólidos dissolvidos totais (SDT);
- c) Existência de sistema de comunicação e tratamento de esgoto: mensurada pela: existência ou não de sistemas de aviso e alerta (SAA) e existência ou não de tratamento de esgoto (ETE).
- d) Impacto a jusante mensurado pelo: impacto econômico a jusante (IEJ), impacto social a jusante (ISJ) e impacto ambiental a jusante (IAJ).

Além das seis variáveis mais utilizadas pelos 17 métodos referenciados no quadro 18, foram selecionadas outras cinco. O assoreamento foi incluído na MARR por ser uma importante variável no que concerne ao volume de água disponível em um rio, lago ou reservatório. A estabilidade de taludes foi incluída, porque a queda de taludes pode representar um risco aos vários usos dos recursos hídricos além de poder interromper o fluxo de água num recurso hídrico. O nível de toxicidade em organismos aquáticos foi incluído porque, considerando o risco de mortandade de peixes e invertebrados aquáticos, pode-se agir preventivamente. A cor da água foi incluída por se tratar de um elemento fundamental quanto à qualidade da água e, também pela facilidade de visualização no local. A presença de indicadores geoquímicos e orgânicos e inorgânicos foi incluída por se tratar dos aspectos das



substâncias químicas que podem prejudicar a qualidade da água, e até mesmo levar as pessoas à morte, dependendo da substância e da quantidade.

Para a metodologia foram definidos critérios e pesos e ao final, a faixa do risco do Índice da Metodologia de Avaliação de Riscos para Reservatórios (IMARR): risco alto, moderado ou baixo. Os próximos itens esclarecem em detalhes as variáveis e suas faixas de mensuração.

A MARR utilizou como embasamento quanto aos princípios, a Lei das Águas (Lei 9.433:1997), a Lei de Segurança de Barragens (Lei 12.334:2010 e Lei 14.066:2020), a Resolução CONAMA 357 (BRASIL, 2005), o Índice de Qualidade de Água da CETESB (2022a) e o Índice de Qualidade das Águas (IQA) da ANA (2005).

## 9.1 Quantidade de Água

Para o pilar “quantidade de água” da MARR, foram definidas as seguintes variáveis: altura do nível d’água (ANA), velocidade do rio (VER), assoreamento ou acúmulo de sedimentos (ASS), estabilidade de taludes (EST) e volume do reservatório (VOL).

### 9.1.1 Altura do Nível D’Água (ANA)

O quadro 24 apresenta a definição das faixas de valores para a variável “Altura do Nível D’água” do reservatório. As faixas foram definidas como uma altura acima do nível normal do reservatório em questão. Por facilidade de mensuração da matriz de riscos foi definida uma escala com três faixas. Estas faixas foram atribuídas considerando que existe alto risco para as pessoas devido a inundações quando a altura do nível da água (ANA) atinge 0,5 metro acima do nível normal da cota do reservatório. Evidentemente, o perigo para automóveis e construções como casas e edifícios, em uma enchente, é de uma cota maior que 0,5 metro e, portanto, este valor já considera o pior cenário e está incluído nas faixas do quadro 24.

Quadro 24 - Variável ANA

Classe	Faixas (ANA = Altura do nível d'água acima do nível normal)
1-Controlado	ANA ≤ 0,3 m acima do nível normal
2-Alerta	0,3 m < ANA ≤ 0,5 m acima do nível normal
3-Atuação Imediata	ANA > 0,5 m acima do nível normal

Fonte: O autor, 2023.

Lacerda (2004) apud Souza (2007), define um procedimento para determinação da área da seção do recurso d'água para rios ou córregos pequenos, através das seguintes etapas:

1. Pegar duas cordas esticadas e atravessadas com distância conhecida entre elas, amarradas em estacas cravadas nas margens, em posição perpendicular ao eixo do recurso d'água. Sob as cordas, mede-se a profundidade do recurso d'água em 10 posições e calcula-se a média (h);
2. Medir a largura do recurso d'água em metros (L);
3. Calcular a área da seção ( $A = h \times L$ )

Onde:

A = Área média da seção transversal do recurso d'água (m<sup>2</sup>)

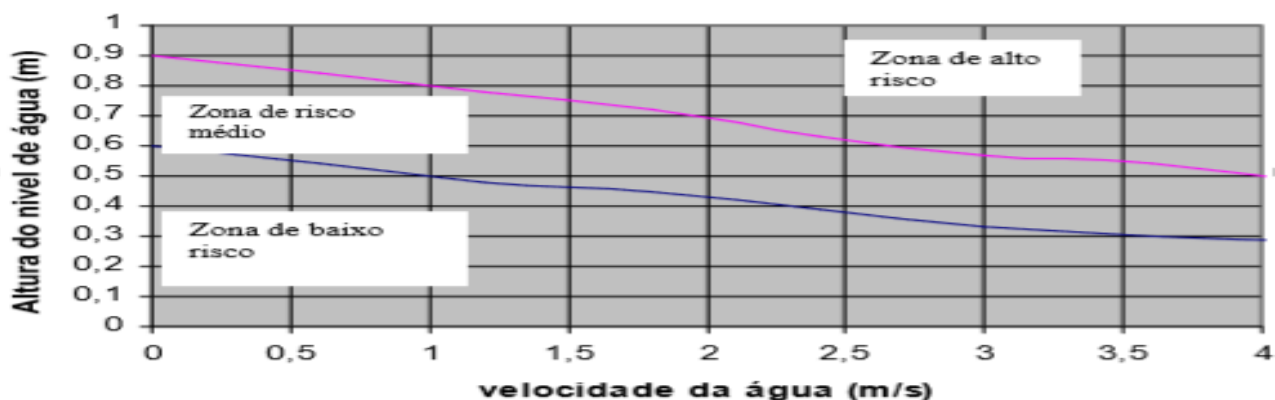
h = profundidade média do recurso d'água (m)

### 9.1.2 Velocidade do Rio (VER)

A velocidade do rio associado ao reservatório é uma das variáveis que podem causar impactos ambientais, sociais e econômicos. Quanto maior a velocidade, maior o perigo iminente de impactos. A velocidade é mensurada em m/s.

Conforme Santos e Silva (1998), o zoneamento de risco é estabelecido em função das características das ondas, através da sua altura máxima e do instante de chegada. Levando-se em consideração a velocidade da água causada pela inundação, as zonas de perigos podem ser: baixa, média e alta tanto para veículos, casas e pessoas. Na figura 35, por exemplo, se a velocidade das águas de enchentes for de 2 m/s e altura de 0,50 m, colocará o veículo numa zona de risco médio.

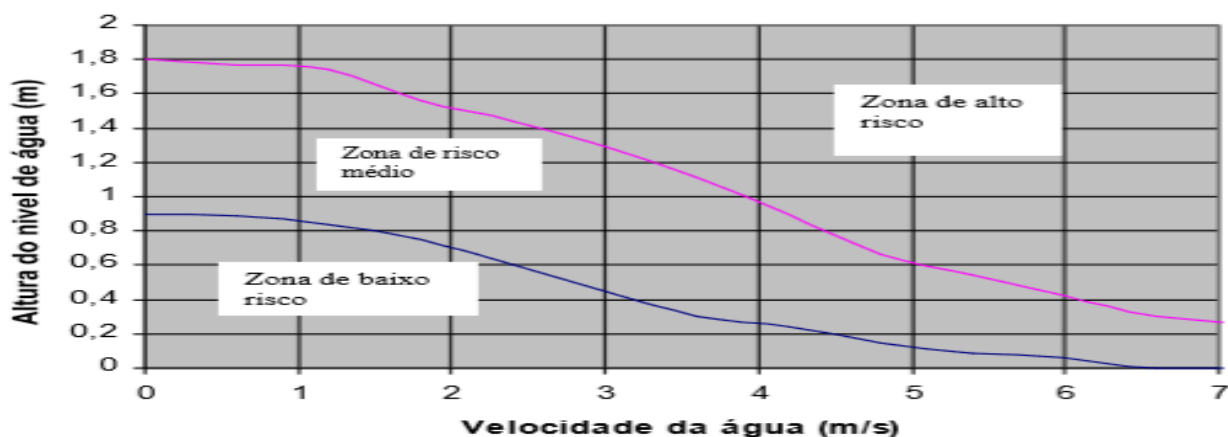
Figura 35 - Riscos para automóveis devido a inundações



Fonte: Santos e Silva (1998).

Na figura 36, por exemplo, se a velocidade das águas de enchentes for de 4 m/s e altura de 1,20 m, colocará as casas em zonas de alto risco.

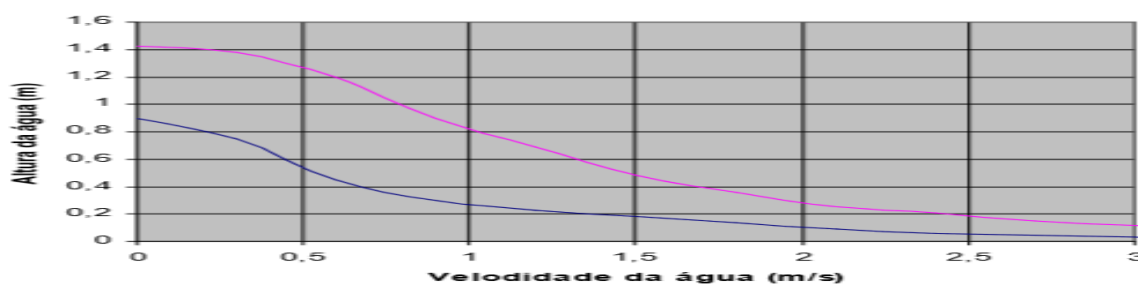
Figura 36 - Riscos para casas devido a inundações



Fonte: Santos e Silva (1998).

No que concerne aos riscos para as pessoas, Santos e Silva (1998), definem a figura 37. Pode-se perceber pela figura, que se a velocidade das águas de enchentes for de 2 m/s, que é comum, e altura de 0,50 m, colocará uma pessoa adulta em zona de alto risco, podendo ser facilmente levada pela correnteza.

Figura 37 - Riscos para pessoas devido a inundações



Fonte: Santos e Silva (1998); HSE (2001).

Verificando-se as figuras 35, 36 e 37, constata-se que as maiores zonas de riscos sempre são para as pessoas, seguido dos automóveis e por último, das construções (casas, edifícios, dentre outros).

O U.S. *Army Corps of Engineers* (1997), faz recomendações para alguns critérios de condições não perigosas quanto a inundações que são definidas no quadro 25.

Quadro 25 - Critérios de condições não perigosas devido a inundações

Critérios de condições não perigosas quanto a inundações	Altura da inundação	Área urbana como rural < 0,60 metros
	Prejuízos às propriedades urbanas	A profundidade da inundação não deve causar prejuízos
	Duração da inundação	Áreas urbanas < 3 horas e Áreas rurais < 24 horas
	Velocidade da água	A velocidade da água da inundação < 1,20 m/s
	Potencial de resíduos e erosão	Deve ser o mínimo possível
	Frequência da inundação	Frequência < 1% (Chuva de período de retorno de 100 anos)

Fonte: U.S. Army Corps of Engineers (1997).

A escala referenciada neste trabalho para a variável velocidade possui três faixas. Estas faixas foram definidas considerando que existe alto risco para as pessoas devido a inundações quando a velocidade da água atinge 2,0 m/s. O quadro 26 apresenta as faixas de definições para a velocidade.

Quadro 26 - Variável velocidade

Classe	Velocidade (VER)
1-Controlado	$VER \leq 1,0 \text{ m/s}$
2-Alerta	$1,0 \text{ m/s} < VER \leq 2,0 \text{ m/s}$
3-Atuação Imediata	$VER > 2,0 \text{ m/s}$

Fonte: O autor, 2023.

Segundo Souza (2007), para mensurar a velocidade de um recurso d'água, utiliza-se um flutuador como por exemplo, uma garrafa com água pela metade, jogando o flutuador no recurso d'água antes da primeira corda. Deve-se medir o tempo "t" (em segundos) gasto para o flutuador percorrer a distância entre as duas cordas esticadas.

A velocidade do flutuador ( $V_{\text{Flutuador}}$ ) é convertida em velocidade média do rio usando-se um coeficiente de redução, que comumente é 0,85 para flutuador superficial.

A expressão matemática é dada pela fórmula 6.

$$V_{\text{Flutuador}} = C / t \quad (6)$$

Onde:

$C$  = Distância entre as cordas (m), normalmente de 4 a 5 vezes a largura do recurso d'água

$t$  = Tempo gasto pelo flutuador para ir de uma corda a outra (s)

Para a cálculo da velocidade do rio ( $V_{\text{Rio}}$ ), utiliza-se a fórmula 7.

$$V_{\text{Rio}} = 0,85 \times V_{\text{Flutuador}} \quad (7)$$

A vazão ( $Q$ ) é calculada pela fórmula 8, multiplicando-se a área ( $A$ ) pela velocidade do rio.

$$Q = A \times V_{\text{Rio}} \quad (8)$$

### 9.1.3 Assoreamento (ASS)

O assoreamento é o acúmulo de sedimentos no fundo de um reservatório ou rio. Segundo Mezine (2015), o monitoramento do assoreamento é necessário, pois a sedimentação reduz a capacidade de armazenamento de água no caso de reservatórios e o volume no caso de rios. Conforme afirma o autor, a sedimentação diminui a capacidade de geração de energia elétrica, como dificulta as atividades de lazer, consumo, irrigação, dentre outros. No caso de UHEs, o assoreamento impacta diretamente na operação e manutenção, e o seu monitoramento deve ser realizado ao longo de todo o ciclo de vida. A sedimentação inclui a erosão, o deslocamento de partículas até o curso d'água seja pela ação do vento, chuvas torrenciais, atividades agropecuárias, dejetos industriais e de residências, dentre outros.

Os sedimentos são adequados para avaliação do nível de contaminação ambiental, pois atuam como sumidouro de contaminantes no ambiente aquático, devido à presença de carbonatos, hidróxidos, silicatos, sulfetos, fosfatos e material orgânico em sua composição. Por isso, os sedimentos ainda podem se manter contaminados, promovendo processos de bioacumulação por muito tempo, mesmo que a água do sistema aquático atenda aos padrões de qualidade (BOTEROA *et al.* 2014 apud PORTELA, 2020).

Carvalho *et al.* (2000) corrobora que a redução da vida útil ou econômica de um reservatório deve ser monitorada pela deposição de sedimentos e argumenta ainda que, os reservatórios pequenos assoreiam mais rápido que os de grande dimensão. Como exemplos, o autor apresenta o reservatório de Itaipu, Sobradinho e

Tucuruí, cujo tempo estimado para assoreamento total pode ser maior que 1000 anos, porém a navegação pode estar comprometida em apenas 20 a 30 anos. Carvalho (2008) afirma que o final da vida útil do reservatório ocorre quando os depósitos de sedimentos alcançam a soleira da tomada d'água impossibilitando a operação adequada da UHE. Para o cálculo do assoreamento é utilizada a fórmula 9.

$$T = V_{RES} / S \quad (9)$$

Onde:

T = Tempo de assoreamento de um determinado volume (anos);

$V_{RES}$  = Volume total do reservatório;

S = Volume de sedimento retido no reservatório por ano ( $m^3$ /ano).

Segundo Mezine (2015), o cálculo da susceptibilidade a erosão está intimamente relacionado ao nível de assoreamento. Segundo o autor, o cálculo da susceptibilidade a erosão é dado pela fórmula 10:

$$IR = \text{Volume Útil} / \text{Vazão Média} \quad (10)$$

A classe da susceptibilidade a erosão é dada pelo quadro 27.

Quadro 27 - Susceptibilidade a erosão

Classe	Índice de Regularização (IR)
1-Baixa susceptibilidade ao assoreamento	IR < 30 dias
2-Média susceptibilidade ao assoreamento	30 dias ≤ IR ≤ 150 dias
3-Alta susceptibilidade ao assoreamento	IR > 150 dias

Fonte: ANA (2013).

Segundo a ANA (2003) apud Mezine (2015), os reservatórios podem ser classificados quanto ao seu potencial de assoreamento, de acordo com o quadro 28.

Quadro 28 - Potencial ao assoreamento

Classe	Parâmetros mensurados
1-Baixo potencial ao assoreamento	Potencial de produção de sedimentos (Pss), Posição relativa na cascata (Prc), Regime de operação do reservatório (Ror), Magnitude e importância dos efeitos do assoreamento (MI)
2-Médio potencial ao assoreamento	
3-Alto potencial ao assoreamento	

Fonte: Adaptado de ANA (2013).

O quadro 29 apresenta as classes para a variável Potencial de Produção de Sedimentos.

Quadro 29 - Potencial de produção de sedimentos

Classe	Perda do solo (Pss)
1-Baixo potencial a produção de sedimentos	$Pss < 25 \text{ t/km}^2.\text{ano}$
2-Médio potencial a produção de sedimentos	$25 \text{ t/km}^2.\text{ano} \leq Pss \leq 100 \text{ t/km}^2.\text{ano}$
3-Alto potencial a produção de sedimentos	$Pss > 100 \text{ t/km}^2.\text{ano}$

Fonte: Adaptado de ANA (2013).

O quadro 30 apresenta as classes para a variável Posição relativa na cascata (Prc).

Quadro 30 - Posição relativa na cascata

Classe	Posição relativa na cascata (Prc)
1-Baixa susceptibilidade	Reservatório de jusante tem uma pequena bacia incremental
2-Média susceptibilidade	Reservatório de jusante tem uma grande bacia incremental
3-Alta susceptibilidade	Reservatório de cabeceira

Fonte: Adaptado de ANA (2013).

O quadro 31 apresenta as classes para a variável Regime de operação do reservatório (Ror), que significa a forma como o reservatório é operado, por regularização ou a fio d'água (ANA, 2013).

Quadro 31 - Regime de operação do reservatório

Classe	Regime de operação do reservatório (Ror)
1-Baixa criticidade	Demais casos que não se enquadram nas outras duas classes
2-Média criticidade	Reservatórios a fio d'água apresentam problemas com o assoreamento na elevação dos níveis da água do remanso a montante
3-Alta criticidade	Reservatórios de regularização perdem capacidade devido ao assoreamento

Fonte: Adaptado de ANA (2013).

O quadro 32 apresenta as classes para a variável Magnitude e importância dos efeitos do assoreamento (MI).

Quadro 32 - Magnitude e importância dos efeitos do assoreamento

Classe	Magnitude e importância dos efeitos do assoreamento (MI)
1-Baixa externalidade	Demais situações
2-Média externalidade	Reservatório possui ao menos uma classificação como média susceptibilidade ou no mínimo 2 municípios com mais de 50 mil habitantes localizados na margem do rio principal
3-Alta externalidade	Reservatório possui alta susceptibilidade ao assoreamento ao menos em um dos parâmetros anteriores, possui hidrovias ou no mínimo 3 municípios com mais de 50 mil habitantes na margem

Fonte: Adaptado de ANA (2013).

Segundo a ANA (2013), o nível de criticidade (NC) do assoreamento é dado pela fórmula 11.

$$NC = (Pss + Prc + MI + (4 \times Ror)) / 21 \quad (11)$$

Onde:

Pss = Perda de solo (quadro 25);

Prc = Posição relativa na cascata (quadro 26);

MI = Magnitude e importância dos efeitos do assoreamento (quadro 28);

Ror = Regime de operação do reservatório (quadro 27).

O quadro 33 apresenta as classes relacionadas ao Nível de Criticidade (NC).

Quadro 33 - Nível de Criticidade

Classe	Nível de Criticidade (NC)
1-Baixa criticidade	$0,50 < NC$ (Reservatório localizado em bacia hidrográfica com pouca produção de sedimentos, o risco de assoreamento é baixo)
2-Média criticidade	$0,50 \leq NC < 0,75$ (Reservatório que apresenta risco menor de assoreamento e os efeitos esperados não são significativos)
3-Alta criticidade	$NC \geq 0,75$ (Reservatório que apresenta risco de assoreamento e os efeitos são prejudiciais a geração de energia elétrica)

Fonte: Adaptado de ANA (2013).

A MARR, no que concerne à variável Assoreamento (ASS) para rios, será composta pelas variáveis Potencial de produção de sedimentos (Pss) e Magnitude e importância dos efeitos do assoreamento (MI), que são as duas variáveis relacionadas aos rios.

Portanto, o nível de criticidade (NCR) do assoreamento de um rio será dado pela fórmula 12.

$$NC = (Pss + MI) / 6 \quad (12)$$

Como proporcionalmente as equações 11 e 12 são semelhantes, pois, o denominador é a soma dos maiores valores das variáveis, pode-se assumir que o quadro 34 serão as mesmas classes e faixas de valores para a MARR. Portanto, o quadro 34 apresenta as classes relacionadas ao Nível de Criticidade para Rios (NCR).

Quadro 34 - Nível de Criticidade para Rios

Classe	Nível de Criticidade para Rios (NCR)
1-Baixa criticidade	$0,50 < NC$ (Rio localizado em bacia hidrográfica com pouca produção de sedimentos, o risco de assoreamento é baixo)
2-Média criticidade	$0,50 \leq NC < 0,75$ (Rio que apresenta risco menor de assoreamento e os efeitos esperados não são significativos)
3-Alta criticidade	$NC \geq 0,75$ (Rio que apresenta risco de assoreamento e os efeitos podem ter impactos ambientais, sociais e econômicos)

Fonte: Adaptado de ANA (2013).



#### 9.1.4 Estabilidade de Taludes (EST)

A instabilidade ou o escorregamento de taludes pode acarretar erosão na margem dos rios ou reservatórios que por sua vez, levam à deposição de sedimentos no rio ou reservatório. A estabilidade de taludes é uma das variáveis que podem causar impactos ambientais, sociais e econômicos. Quanto mais escorregamentos de taludes houver, maior o perigo iminente de impactos.

A escala da variável estabilidade de taludes possui três faixas que foram definidas tendo como base aquelas incluídas na Lei 12.334:2010 e Lei 14.066:2020 e consideradas na Metodologia de Riscos para Barragens. O quadro 35 apresenta as faixas de definições para a estabilidade de taludes neste trabalho.

Quadro 35 - Variável estabilidade de taludes

Classe	Estabilidade de Taludes (EST)
1-Controlado	Inexistente ou algumas falhas na proteção de taludes
2-Alerta	Erosões superficiais, raízes expostas de árvores, falta de vegetação, necessitando ação corretiva
3-Atuação Imediata	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão com potencial de comprometimento de riscos no rio

Fonte: Adaptado da LEI 12.334:2010 e LEI 14.066:2020.

#### 9.1.5 Volume do reservatório (VOL)

Considera-se vazão, o volume por unidade de tempo que passa por uma seção do rio, sendo mensurada em  $m^3/s$ . Pode-se definir que a vazão é a área ( $m^2$ ) multiplicada pela velocidade ( $m/s$ ) de escoamento do rio. A vazão do rio é uma das variáveis que podem causar impactos ambientais, sociais e econômicos. Quanto maior a vazão, maior o perigo iminente de impactos.

Na Metodologia de Análise de Riscos para Barragens que teve como base a Lei de Segurança de Barragens (LEI 12.334:2010 e LEI 14.066:2020), definiu-se o “volume” e faixas de valores, conforme quadro 36.

Quadro 36 - Variável volume definida para reservatórios

Volume	Faixas
1-Pequeno	$VOL \leq 5$ milhões $m^3$
2-Médio	$5$ milhões $m^3 < VOL \leq 75$ milhões $m^3$
3-Grande	$75$ milhões $m^3 < VOL \leq 200$ milhões $m^3$
4-Muito Grande	$VOL > 200$ milhões $m^3$

Fonte: Adaptado da Lei 12.334:2010 e Lei 14.066:2020.

## 9.2 Qualidade da Água

Para o pilar “qualidade da água” da MARR, foram definidas as seguintes variáveis: nível de toxicidade em organismos aquáticos (NTO), turbidez da água (TUA), nível de pH (NPH), cor da água (COA), presença de indicadores geoquímicos orgânicos e inorgânicos (PIGOI), nível de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nível de Oxigênio Dissolvido (NOD), coliformes fecais (COF), temperatura (TEM) e sólidos dissolvidos totais (SDT).

### 9.2.1 Nível de Toxicidade em Organismos Aquáticos (NTO)

Segundo Zucker (1985), a toxicidade aguda ou concentração letal é a concentração de um tóxico em que determinado percentual de organismos expostos morrem. A classificação quanto a toxicidade aguda para peixes e invertebrados aquáticos deste trabalho é dada pelo quadro 37.

Quadro 37 - Nível de toxicidade em organismos aquáticos

Classe	NTO ( $CL_{50}$ em mg/l)
1-Praticamente Não-Tóxico	$NTO \geq 100$
2-Ligeiramente Tóxico	$10 \leq NTO < 100$
3-Medianamente Tóxico	$1 \leq NTO < 10$
4-Altamente Tóxico	$0,1 \leq NTO < 1,0$
5-Extremamente Tóxico	$NTO < 0,1$

Fonte: Adaptado de ZUCKER, 1985.

### 9.2.2 Turbidez da Água (TUA)

Segundo Sperling (2005), a turbidez é a própria transparência da água, sendo dependente do conteúdo existente de material particulado em suspensão. Quando a turbidez da água está alta, existe material particulado em suspensão, indicando alto conteúdo orgânico e inorgânico em suspensão que pode permitir a procriação de micro-organismos e reduzir a eficiência do tratamento químico e físico da água (SPERLING, 2005). A unidade de medida da turbidez é a Unidade de Turbidez Nefelométrica (UTN).

Esta dissertação considera os rios de água doce classe 3, que conforme a CONAMA 357:2005, são águas destinadas ao abastecimento humano após o tratamento convencional ou avançado, à irrigação de culturas arbóreas, à pesca amadora, à recreação de contato secundário e à dessedentação de animais.

Esta variável faz parte do Índice de Qualidade da Água da CETESB (2009).

O quadro 38 apresenta as faixas de valores para a turbidez da água deste trabalho.

Quadro 38 - Turbidez da água

Classe	Turbidez da água (TUA)
1-Controlado	TUA < 40 UTN (Rios classe 1)
2-Satisfatório	$40 \leq TUA \leq 100$ UTN (Rios classe 2 e 3)
3-Atuação Imediata	TUA > 100 UTN (Turbidez alta, presença de material particulado em suspensão)

Fonte: Adaptado de Brasil, 2017; ANA, 2005.

### 9.2.3 Nível de pH (NPH)

O potencial hidrogeniônico (pH) é a concentração de cátions em diferentes tipos de solução com valores de 0 a 14,0, sendo de 0 a 7,0, uma solução ácida, igual a 7 uma solução neutra e de 7,0 a 14,0, uma solução básica ou alcalina. O pH de uma água distribuída pelas concessionárias varia de 6,0 a 9,5.

Segundo Prati, Pavanello e Pesarin (1971), apud Almeida (2021), o pH é excelente quando está entre 6,5 e 8,0; aceitável quando está entre 6,0 e 6,4 ou entre 8,1 e 8,4; ligeiramente poluído quando está entre 5,0 e 5,9 ou entre 8,5 e 9,0;

poluído quando está entre 3,9 e 4,9 ou entre 9,1 e 10,1; fortemente poluído quando é menor que 3,9 ou maior que 10,1.

Esta variável faz parte do Índice de Qualidade de Água da CETESB (2009).

A Resolução CONAMA 357/2005, define que águas das Classes Especial I e II, são destinadas à preservação da vida aquática, e estipula que a faixa de pH para essas classes deve ser de 6,0 a 9,0.

O quadro 39 apresenta as faixas de valores para o nível de pH definidas neste trabalho.

Quadro 39 - Nível de pH

Classe	Nível de pH (NPH)
1-Aceitável	$6 \leq \text{NPH} \leq 9$
2-Alcalina	$\text{NPH} \geq 9$ (Se houve despejo de soda, há formação de óxido de cálcio que provoca corrosão do epitélio branquial e das nadadeiras, levando os peixes à morte)
3-Ácida	$\text{NPH} < 6$ (se houver despejo de ácidos, os peixes precisarão respirar frequentemente na superfície e se cair muito o pH, os peixes têm morte imediata)

Fonte: Adaptado de Brasil (2005); CETESB, 2022a.

#### 9.2.4 Cor da Água (COA)

Segundo a Sabesp (2022), a cor da água é um dado que indica a presença de substâncias dissolvidas na água. Assim como a turbidez, a cor é um parâmetro de aspecto estético de aceitação ou rejeição do produto. O valor máximo permissível de cor na água distribuída é de 15,0 U.C. (unidade de cor). A CONAMA 357:2005 fornece o limite máximo para a cor da água que é de 75,0 mg Pt/L e é este limite que será utilizado na MARR.

O quadro 40 apresenta as faixas de valores para a cor da água definidas para este trabalho.

Quadro 40 - Cor da água

Classe	Cor da água (COA)
1-Aceitável	$\text{COA} \leq 75,0 \text{ mg Pt/L}$
2-Inaceitável	$\text{COA} > 75 \text{ mg Pt/L}$

Fonte: Adaptado de Brasil (2005).

### 9.2.5 Presença de Indicadores Geoquímicos, Orgânicos e Inorgânicos (PIGOI)

Segundo Portela (2020), a presença de Indicadores geoquímicos, orgânicos e inorgânicos em ambientes aquáticos é uma grande preocupação, especialmente em áreas altamente antropizadas. Indicadores que são de interesse em relação à poluição de sedimentos incluem elementos potencialmente tóxicos (EPTs) e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HPAs). As principais fontes antropogênicas de EPTs incluem fertilizantes, pesticidas, tráfego de veículos e mineração.

Este trabalho inclui particularmente os indicadores geoquímicos, orgânicos e inorgânicos, que podem representar maior risco à saúde humana.

Para a concentração dos elementos em águas doces de classes 1, 2 e 3, a Resolução CONAMA nº. 357:2005 (BRASIL, 2005) define os limites máximos permitidos para os parâmetros inorgânicos (quadro 41).

Quadro 41 - Valores máximos permitidos para os parâmetros inorgânicos

Elemento	Valores máximos permitidos (Rios classe I, II e III)	Incluída no IQA CETESB (2009)
Alumínio - Al	I-II = 0,1 mg/L III = 0,2 mg/L	
Arsênio - As	I-II = 0,01 mg/L III = 0,033 mg/L	
Bário - Ba	I-II = 0,7 mg/L III = 1,0 mg/L	
Berílio - Be	I-II = 0,04 mg/L III = 0,1 mg/L	
Cádmio - Cd	I-II = 0,001 mg/L III = 0,01 mg/L	
Chumbo - Pb	I-II = 0,01 mg/L III = 0,033 mg/L	
Cobalto - Co	I-II = 0,05 mg/L III = 0,2 mg/L	
Cobre - Cu	I-II = 0,009 mg/L III = 0,013 mg/L	
Cromo - Cr	I-II-III = 0,05 mg/L	
Ferro - Fe	I-II = 0,3 mg/L III = 5,0 mg/L	
Fósforo - P	I-II = 0,1 mg/L III = 0,05 mg/L	Sim
Lítio - Li	I-II-III = 2,5 mg/L	
Manganês - Mn	I-II = 0,1 mg/L III = 0,5 mg/L	
Merúrio - Hg	I-II = 0,0002 mg/L III = 0,002 mg/L	
Níquel - Ni	I-II-III = 0,025 mg/L	
Nitrogênio Amoniacal Total - N	Para pH ≤ 7,5 => N = 3,7 / 13,3 mg/L Para 7,5 < pH ≤ 8,0 => N = 2,0 / 5,6 mg/L Para 8,0 < pH ≤ 8,5 => N = 1,0 / 2,2 mg/L Para pH > 8,5 => N = 0,5 / 1,0 mg/L	
Prata - Ag	I-II = 0,01 mg/L III = 0,05 mg/L	
Selênio - Se	I-II = 0,01 mg/L III = 0,05 mg/L	
Sulfato – SO <sub>4</sub>	I-II-III = 250 mg/L	
Zinco - Zn	I-II = 0,18 Mg/L III = 5 mg/L	

Fonte: CONAMA nº. 357:2005 (BRASIL, 2005).

O quadro 42 apresenta as variáveis incluídas no Índice de Qualidade da Água da CETESB, com suas unidades de medições e pesos (CETESB, 2009), semelhante

ao índice de qualidade de água canadense CCME (2001). Também foi incluído um campo apresentando a representação da variável na MARR.

Quadro 42 - Variáveis incluídas no IQA-CETESB e sua representação na MARR

Variáveis	Unidade	Peso (IQA-CETESB / IQA-CCME)	Variável MARR
Coliformes fecais	NMP/100 mL	0,15	COF
pH	----	0,12	NPH
DBO	mg/L	0,10	DBO
Nitrogênio Amoniacal Total	mg/L	0,10	Incluída na variável PII
Fósforo Total	mg/L	0,10	Incluída na variável PII
Temperatura	°C	0,10	TEM
Turbidez	UNT	0,08	TUA
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	0,08	SDT
Oxigênio Dissolvido	% saturação	0,17	NOD

Fonte: Adaptado de CETESB, 2009; CCME, 2001.

O quadro 43 apresenta as faixas de valores para a presença de contaminantes inorgânicos definidas para este trabalho e que foram baseadas na CONAMA 357:2005.

Quadro 43 - Presença de indicadores inorgânicos (PII)

Elemento	RIO CLASSE I e II (mg/L)		RIO CLASSE III (mg/L)	
	1-ACEITÁVEL	2-INACEITÁVEL	1-ACEITÁVEL	2-INACEITÁVEL
Alumínio – Al	Al ≤ 0,1	Al > 0,1	Al ≤ 0,2	Al > 0,2
Arsênio – As	As ≤ 0,01	As > 0,01	As ≤ 0,033	As > 0,033
Bário – Ba	Ba ≤ 0,7	Ba > 0,7	Ba ≤ 1,0	Ba > 1,0
Berílio – Be	Be ≤ 0,04	Be > 0,04	Be ≤ 0,1	Be > 0,1
Cádmio - Cd	Cd ≤ 0,001	Cd > 0,001	Cd ≤ 0,01	Cd > 0,01
Chumbo - Pb	Pb ≤ 0,01	Pb > 0,01	Pb ≤ 0,033	Pb > 0,033
Cobalto - Co	Co ≤ 0,05	Co > 0,05	Co ≤ 0,2	Co > 0,2
Cobre – Cu	Cu ≤ 0,009	Cu > 0,009	Cu ≤ 0,013	Cu > 0,013
Cromo - Cr	Cr ≤ 0,05	Cr > 0,05	Cr ≤ 0,05	Cr > 0,05
Ferro – Fe	Fe ≤ 0,3	Fe > 0,3	Fe ≤ 5,0	Fe > 5,0
Fósforo - P	P ≤ 0,1	P > 0,1	P ≤ 0,05	P > 0,05
Lítio – Li	Li ≤ 2,5	Li > 2,5	Li ≤ 2,5	Li > 2,5
Manganês - Mn	Mn ≤ 0,1	Mn > 0,1	Mn ≤ 0,5	Mn > 0,5
Mercúrio - Hg	Hg ≤ 0,0002	Hg > 0,0002	Hg ≤ 0,002	Hg > 0,002
Níquel - Ni	Ni ≤ 0,025	Ni > 0,025	Ni ≤ 0,025	Ni > 0,025
Nitrogênio Amoniacal Total – N	pH ≤ 7,5 => N ≤ 3,7 7,5 < pH ≤ 8,0 => N ≤ 2,0 8,0 < pH ≤ 8,5 => N ≤ 1,0 pH > 8,5 => N ≤ 0,5	N > 3,7 N > 2,0 N > 1,0 N > 0,5	N ≤ 13,3 N ≤ 5,6 N ≤ 2,2 N ≤ 1,0	N > 13,3 N > 5,6 N > 2,2 N > 1,0
Prata - Ag	Ag ≤ 0,01	Ag > 0,01	Ag ≤ 0,05	Ag > 0,05
Selênio - Se	Se ≤ 0,01	Se > 0,01	Se ≤ 0,05	Se > 0,05
Sulfato – SO <sub>4</sub>	SO <sub>4</sub> ≤ 250	SO <sub>4</sub> > 250	SO <sub>4</sub> ≤ 250	SO <sub>4</sub> > 250
Zinco - Zn	Zn ≤ 0,18	Zn > 0,18	Zn ≤ 5	Zn > 5

Fonte: O autor, 2023.

O Relatório de Campanha do Programa de Monitoramento Limnológico e de Qualidade da Água que a Eletrobras Furnas elabora trimestralmente para os reservatórios de sua atuação, mede as seguintes variáveis: temperatura da água, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, pH, turbidez, cor/transparência, nitrato, amônia, fósforo, sílica, sólidos, ferro, cloreto, clorofila a, cálcio, magnésio, sódio, potássio, sulfato, cromo, chumbo, cádmio, manganês, níquel, mercúrio, alumínio, DBO e coliformes. Os limites para os parâmetros inorgânicos foram apresentados na tabela 41 (Presença de Indicadores Inorgânicos – PII).

Para o cálculo da variável PII deve-se primeiramente selecionar a classe do rio no quadro 43 e logo após, somar os valores aceitáveis (1) ou inaceitáveis (2) de cada variável, dividido por 20 que é o número de elementos definidos no quadro. A equação 6 define o cálculo do PII:

$$PII = (Al + As + Ba + Be + Cd + Pb + Co + Cu + Cr + Fe + P + Li + Mn + Hg + Ni + N + Ag + Se + SO_4 + Zn) / 20 \quad (6)$$

Segundo Silva (2013), a contaminação dos solos por elementos potencialmente tóxicos (EPTs) provoca alterações na estrutura e no funcionamento dos ecossistemas, além de oferecer riscos à saúde pública. Os EPTs estão presentes naturalmente no ambiente. Atividades antropogênicas como emissões industriais, efluentes urbanos, dejetos de animais, fertilizantes e defensivos agrícolas podem contribuir para aumento da concentração dos ETPs. Silva (2013) mensurou os teores de Arsênio, Cádmio, Cobalto, Cobre, Cromo, Chumbo, Níquel e Zinco. Todos estes elementos já foram identificados no quadro 43 e fazem parte da MARR.

Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) constituem uma classe de compostos orgânicos, formados por átomos de carbono e hidrogênio, cuja estrutura forma dois ou mais anéis aromáticos condensados. Geralmente, os HPAs são formados a partir da combustão incompleta de material orgânico e são considerados poluentes orgânicos persistentes, uma vez que apresentam atividades mutagênicas e carcinogênicas, as quais causam impactos negativos à saúde humana e ao meio ambiente (GUIMARÃES, 2014).

Segundo a Autoridade de Segurança Alimentar e Econômica (ASAE, 2023) da Europa, os HPAs possuem propriedades carcinogênicas e mutagênicas e por isso, há necessidade de um controle regular nos alimentos, ar, água e solos. O Decreto de Lei nº 236/98 de 1 de agosto de 1998, estabelece que a soma das concentrações de seis HPAs presentes nas águas superficiais não pode exceder o

valor de 1,0 g/L, considerando os seguintes HPAs: fluoranteno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(a)pireno, benzo(g,h,i)perileno e o indeno1,2,3-cdpireno.

Para o cálculo da variável Presença de Indicadores Geoquímicos e Orgânicos (PIGO), foi definido o quadro 44 que apresenta os limites máximos dos parâmetros definidos pelas organizações. Nesta categoria de parâmetros foram englobados os indicadores geoquímicos e orgânicos, bem como aqueles incluídos no Relatório de Campanha do Programa de Monitoramento Limnológico e de Qualidade da Água da Eletrobras Furnas.

Quadro 44 - Valores máximos permitidos para os parâmetros geoquímicos e orgânicos

Elemento	Organização	Limites máximos (mg/L)
Clorofila a - Cl	CONAMA n°. 357:2005 (Rios classe I, II e III)	I-II = 0,010 III = 0,060
Sílica - Si	ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists)	0,025
Cloreto - Ct	Brasil (2004) Ministério da Saúde Portaria 518:2004 e Resolução CONAMA 396:2008	I-II = 250 III = 100-700
Sódio - So		I-II = 200 III = 300
HPA Fluoranteno, HPA Benzo(b)fluoranteno, HPA Benzo(k)fluoranteno, HPA Benzo(a)pireno, HPA Benzo(g,h,i)perileno, HPA Indeno1,2,3-cdpireno	Autoridade de Segurança Alimentar e Econômica (ASAE, 2023) da Europa	A soma de todos deve ser menor que 1000

Fonte: O Autor, 2023.

O quadro 45 apresenta as faixas de valores para a presença de indicadores geoquímicos e orgânicos definidas para este trabalho e que foram baseadas nas organizações do quadro 44 (Resolução CONAMA n°. 357:2005; CETESB, 2009); ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists), Brasil (2004) - Ministério da Saúde - Portaria 518:2004; Resolução CONAMA 396:2008; Autoridade de Segurança Alimentar e Econômica (ASAE, 2023) da Europa).

Quadro 45 - Presença de indicadores geoquímicos e orgânicos (PIGO)

Elemento	RIO CLASSE I e II (mg/L)		RIO CLASSE III (mg/L)	
	1-ACEITÁVEL	2-INACEITÁVEL	1-ACEITÁVEL	2-INACEITÁVEL
Clorofila a - Cl	Cl ≤ 0,010	Cl > 0,010	Cl ≤ 0,060	Cl > 0,060
Sílica - Si	Si ≤ 0,025	Si > 0,025	Si ≤ 0,025	Si > 0,025
Cloreto - Ct	Ct ≤ 250	Ct > 250	Ct ≤ 300	Ct > 300
Sódio - So	So ≤ 200	So > 200	So ≤ 300	So > 300
HPA Fluoranteno, Benzo(b) fluoranteno, Benzo(k)fluoranteno, Indeno1,2,3-cdpireno Benzo(a)pireno, Benzo(g,h,i)perileno	HPA ≤ 1000	HPA > 1000	HPA ≤ 1000	HPA > 1000

Fonte: O autor, 2023.



Como o intervalo dos limites máximos do cloreto (Ct) para a classe III de rios é uma faixa grande de valores, foi definido para a MARR o valor de 300mg/L.

Para o cálculo da variável PIGO deve-se primeiramente selecionar a classe do rio no quadro 40 e logo após, somar os valores aceitáveis (1) ou inaceitáveis (2) de cada variável, dividido por 5 que é o número de elementos definidos no quadro 45. A equação 7 define o cálculo do PIGO:

$$\text{PIGO} = (\text{Cl} + \text{CE} + \text{Si} + \text{Ct} + \text{So} + \text{HPA}) / 5 \quad (7)$$

Finalmente, para o cálculo da variável “Presença de Indicadores Geoquímicos, Orgânicos e Inorgânicos (PIGOI), procede-se à média aritmética de PIGO e PII, conforme a equação 8:

$$\text{PCOI} = (\text{PII} + \text{PIGO}) / 2 \quad (8)$$

#### 9.2.6 Nível de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) corresponde à quantidade de oxigênio consumida por microrganismos presentes em uma certa amostra de efluente (como o esgoto doméstico e o industrial). Como esses microrganismos realizam a decomposição da matéria orgânica no meio aquático, conhecer a quantidade desse gás é uma forma efetiva de analisar o nível de poluição existente nesse meio (Brasil Escola, 2023). A DBO é um excelente índice para indicar a eficiência de uma ETE (estação de tratamento de esgotos), quando se compara a DBO do esgoto bruto e do efluente final (PORTAL TRATAMENTO DE ÁGUA, 2023). Esta variável faz parte do Índice de Qualidade da Água da CETESB (2009).

O quadro 46 apresenta as faixas de valores para o DBO definidas neste trabalho.

Quadro 46 - Nível de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

Classe	Nível de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)		
	RIO CLASSE I (mg/L)	RIO CLASSE II (mg/L)	RIO CLASSE III (mg/L)
1-Aceitável	DBO ≤ 3 mg/L	DBO ≤ 5 mg/L	DBO ≤ 10 mg/L
2-Não Aceitável	DBO > 3 mg/L	DBO > 5 mg/L	DBO > 10 mg/L

Fonte: Adaptado de Brasil (2005).

### 9.2.7 Nível de Oxigênio Dissolvido (NOD)

Segundo Mundo Educação (2023), o oxigênio dissolvido (OD) é responsável por oxidar o material orgânico presente na água e promover a respiração branquial dos peixes, pois a matéria orgânica é derivada de esgotos lançados nos rios, e, por isso, a matéria orgânica deve ser reduzida ou oxidada. A quantidade de oxigênio necessária para oxidar partículas orgânicas é denominada DBO. Se a DBO for elevada, será preciso grandes taxas de OD para oxidá-la e não restará oxigênio suficiente para a respiração dos peixes. Quando a população aquática diminui, a DBO aumenta ainda mais, agravando a situação.

A ausência de OD na água dá espaço para o desenvolvimento de espécies anaeróbicas, que sobrevivem na ausência de oxigênio. O grande problema é que este tipo de bactéria decompõe a matéria orgânica em compostos com odor ruim (MUNDO EDUCAÇÃO, 2023).

Segundo Prati, Pavanello e Pesarin (1971), OD é excelente quando está entre 88% e 112%; aceitável quando está entre 75% e 87% ou entre 113% a 125%; ligeiramente poluído quando está entre 50% e 74% ou entre 126% e 150%; poluído quando está entre 20% e 49% ou entre 151% e 200%; fortemente poluído quando é menor que 19% ou maior que 201%. Segundo a Resolução CONAMA 357 (2005), o OD de qualquer amostra não deve ser inferior a 6 mg/L O<sub>2</sub>.

Esta variável faz parte do Índice de Qualidade da Água da CETESB (2009).

Segundo Von Serling (1996) apud Cervi (2017), as águas podem apresentar baixos valores de OD, quando há um consumo excessivo por parte dos peixes e do fitoplâncton, indicativos de excessiva atividade biológica, e processos de eutrofização. Exposições prolongadas a concentrações abaixo de 5 mg/l podem não matar alguns organismos presentes, mas aumenta a susceptibilidade ao estresse, enquanto períodos longos de exposição, abaixo de 2 mg/l, podem levar à morte a maioria dos organismos (CETESB, 2009). O quadro 47 apresenta as faixas de valores para o NOD definidas neste trabalho, considerando a unidade de mg/L O<sub>2</sub>.

Quadro 47 - Nível de Oxigênio Dissolvido (NOD) para mg/L O<sub>2</sub>

Classe	Nível de Oxigênio Dissolvido (NOD)
1-Aceitável – Rio classe 1	NOD $\geq$ 6 mg/L O <sub>2</sub>
1-Aceitável – Rio classe 2	NOD $\geq$ 5 mg/L O <sub>2</sub>
1-Aceitável – Rio classe 3	NOD $\geq$ 4 mg/L O <sub>2</sub>

2-Inaceitável	NOD < 4 mg/L O <sub>2</sub>
---------------	-----------------------------

Fonte: Adaptado de Brasil (2005).

### 9.2.8 Coliformes Fecais (COF)

Os coliformes estão presentes em grade quantidades nas fezes do ser humano e dos animais de sangue quente. A presença de coliformes na água não apresenta, por si só, um perigo à saúde, mas indica a possível presença de outros organismos causadores de problemas à saúde. Os principais indicadores de contaminação fecal são as concentrações de coliformes totais e coliformes fecais, expressa em número de organismos por 100 ml de água. De modo em geral, nas águas para abastecimento o limite de coliformes legalmente toleráveis não deve ultrapassar 4.000 coliformes em 100 ml de água em 80% das amostras colhidas em qualquer período do ano (FRANCO, 2003, apud CASTRO, 2007).

Atualmente denominados de termotolerantes, os coliformes fecais são o grupo dos coliformes totais que estão presentes especificamente no intestino e nas fezes de animais de sangue quente e são considerados uma indicação mais precisa de contaminação fecal de animais e humanos (FRANCO, 2003, apud CASTRO, 2007).

Esta variável faz parte do Índice de Qualidade da Água da CETESB (2009).

Segundo a resolução CONAMA 357:2005, a quantidade de coliformes termotolerantes, não deverá ultrapassar o limite de 200 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais, de pelo menos 6 amostras, coletadas durante o período de um ano, com frequência bimestral. Como este parâmetro é mais restritivo que o anterior, optou-se por utilizá-lo como valor limite neste trabalho.

O quadro 48 apresenta as faixas de valores para a variável COF definidas neste trabalho.

Quadro 48 - Nível de Coliformes Fecais (COF)

Classe	Nível de Coliformes Fecais (COF)
1-Aceitável	COF ≤ 200 coliformes termotolerantes / 100 mililitros
2-Inaceitável	COF > 200 coliformes termotolerantes / 100 mililitros

Fonte: Adaptado de Brasil (2005).

### 9.2.9 Temperatura (TEM)

A Resolução CONAMA 357/2005 não estabelece limites para a temperatura. No entanto, este é um dos parâmetros físicos mais importantes nos estudos dos ecossistemas aquáticos, uma vez que influencia diretamente a cinética dos processos metabólicos oxidativos vitais, como a respiração; a solubilidade dos gases dissolvidos, como o oxigênio e a densidade da água (QUEIROZ, 2003, apud TRANNIN *et al.*, 2013).

Esta variável faz parte do Índice de Qualidade da Água da CETESB (2009).

Segundo a CETESB (2022b), a temperatura da água é um dos fatores ecológicos mais importantes para os peixes, sendo que a tolerância a temperaturas extremas depende da espécie, do estágio de desenvolvimento e do período de aclimação a que foram submetidos os organismos. Tilápias, por exemplo, podem resistir a temperaturas acima de 35°C, mas não resistem a exposição prolongada em temperaturas abaixo de 10°C. Já as trutas vivem em águas mais frias, sendo o ideal para essa espécie temperaturas entre 10 e 20°C. Em geral, para cada espécie existem faixas de temperatura ideais para o crescimento e alimentação. É também notadamente conhecida a influência das mudanças de temperatura na reprodução ou na migração.

A temperatura, o oxigênio dissolvido e o efeito da contaminação são fatores intimamente relacionados no ambiente aquático, já que com o aumento de temperatura há aumento da taxa metabólica dos organismos, acarretando maior gasto energético, consumo de oxigênio e maior sensibilidade aos efeitos dos poluentes (CETESB, 2022b).

De um modo geral, pode-se descrever os efeitos deletérios da temperatura nos peixes em função de temperaturas predominante altas ou baixas. Poucas espécies resistem a temperaturas elevadas acima de 35°C, assim como também a maioria não resiste a temperaturas inferiores a 10°C (CETESB, 2022b).

O quadro 49 apresenta as faixas de valores para a variável TEM definidas neste trabalho.

Quadro 49 - Temperatura (TEM)

Classe	Temperatura (TEM)
1-Aceitável	$10^{\circ}\text{C} \leq \text{TEM} \leq 35^{\circ}\text{C}$
2-Inaceitável	$\text{TEM} < 10^{\circ}\text{C}$ ou $\text{TEM} > 35^{\circ}\text{C}$

Fonte: Adaptado de CETESB (2022b).

### 9.2.10 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)

A Resolução CONAMA 357/2005 define que o SDT deve ser no máximo 500 mg/L. O quadro 50 apresenta as faixas de valores para a variável SDT definidas neste trabalho.

Quadro 50 - Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)

Classe	Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)
1-Aceitável	$\text{SDT} \leq 500 \text{ mg/L}$
2-Inaceitável	$\text{SDT} > 500 \text{ mg/L}$

Fonte: Adaptado de Brasil (2005).

## 9.3 Existência de Sistema de Comunicação e Tratamento Esgoto

Para o pilar “existência de sistema de comunicação e tratamento de esgoto” da MARR foram definidas as seguintes variáveis: existência ou não de sistemas comunicação ou aviso e alerta (SAA) e existência ou não de tratamento de esgoto (ETE).

### 9.3.1 Existência ou não de sistema de comunicação ou aviso e alerta (SAA)

Esta variável foi incluída na MARR devido ao fato de ser importante a existência de sistema de aviso e alerta no sentido de na eminência de escorregamentos de taludes, inundações, dentre outros processos perigosos, minimizar os impactos sobre as pessoas, pois estas podem ter um tempo maior para evacuarem o local.

O quadro 51 apresenta as faixas de valores para a variável SAA definidas neste trabalho.

Quadro 51 - Existência ou não de sistema de aviso e alerta (SAA)

Classe	Existência ou não de sistema de aviso e alerta (SAA)
1-Existe	Existe sistema de aviso e alerta
2-Não Existe	Não existe sistema de aviso e alerta

Fonte: O Autor, 2023.

### 9.3.2 Existência ou não de Tratamento de Esgoto (ETE)

Segundo Almeida (2021), corroborando com Horton (1965), esta variável reflete o percentual da população atendida por tratamento de esgoto.

A variável foi incluída na MARR devido ao fato de ser importante a existência de tratamento de esgoto, visto que pode minimizar em muito as doenças contraídas por contaminação das substâncias tóxicas existentes no esgoto. Outra razão importante da inclusão desta variável na MARR é que obviamente, o número de parâmetros que podem afetar a qualidade da água é muito maior do que as variáveis definidas como componentes da MARR. Os demais parâmetros não considerados na MARR decorrem da existência ou não do tratamento de esgoto.

O quadro 52 apresenta as faixas de valores para a variável ETE definidas neste trabalho.

Quadro 52 - Existência ou não de tratamento de esgoto (ETE)

Classe	Existência ou não de tratamento de esgoto (ETE)
1-Existe	Existe tratamento de esgoto
2-Não Existe	Não existe tratamento de esgoto

Fonte: O autor, 2023.

## 9.4 Impacto a Jusante

Para o pilar “impacto a jusante” da MARR foram definidas as seguintes variáveis: impacto econômico a jusante (IEJ), impacto social a jusante (ISJ) e impacto ambiental a jusante (IAJ).

Os impactos econômicos, sociais e ambientais podem ser catastróficos a jusante, dependendo do tamanho das cidades a jusante da barragem em termos de população, residências, escolas, hospitais, estradas, ruas, animais, plantações, fazendas, dentre outras benfeitorias.

#### 9.4.1 Impacto econômico a jusante (IEJ)

A escala da variável impacto econômico a jusante possui quatro faixas que foram definidas tendo como base aquelas incluídas na Lei 12.334:2010 e Lei 14.066:2020 e consideradas na Metodologia de Riscos para Barragens. O quadro 53 apresenta as faixas de definições para o impacto econômico a jusante neste trabalho.

Quadro 53 - Variável impacto econômico a jusante

Classe	Impacto econômico a jusante (IEJ)
1-Baixo	Sem danos a residências ou despesas < R\$ 200 mil
2-Pequeno	Danificadas até 5 casas ou R\$ 200 mil ≤ despesas ≤ R\$ 1 milhão
3-Médio	Danificadas de 6 a 49 casas ou R\$1 milhão < despesas ≤ R\$10 milhões
4-Alto	Danificadas mais de 50 casas ou despesas > R\$10 milhões

Fonte: Adaptado da LEI 12.334:2010 e LEI 14.066:20.

#### 9.4.2 Impacto social a jusante (ISJ)

A escala da variável impacto social a jusante possui quatro faixas que foram definidas tendo como base aquelas incluídas na Lei 12.334:2010 e Lei 14.066:2020 e consideradas na Metodologia de Riscos para Barragens. O quadro 54 apresenta as faixas de definições para o impacto social a jusante neste trabalho.

Quadro 54 - Variável impacto social a jusante

Classe	Impacto social a jusante (ISJ)
1-Baixo	População não é afetada
2-Pequeno	Pessoas afetadas < 100 ou perda de capacidade produtiva < 10%
3-Médio	100 ≤ pessoas afetadas ≤ 1000 ou 10% ≤ perda de capacidade produtiva ≤ 30%
4-Alto	Pessoas afetadas > 1000 ou perda de capacidade produtiva > 30%

Fonte: Adaptado da LEI 12.334:2010 e LEI 14.066:20.

### 9.4.3 Impacto ambiental a jusante (IAJ)

A escala da variável impacto ambiental a jusante possui quatro faixas que foram definidas tendo como base aquelas incluídas na Lei 12.334:2010 e Lei 14.066:2020 e consideradas na Metodologia de Riscos para Barragens. O quadro 55 apresenta as faixas de definições para o impacto ambiental a jusante neste trabalho.

Quadro 55 - Variável impacto ambiental a jusante

Classe	Impacto ambiental a jusante (IAJ)
1-Baixo	Área afetada $\leq$ a 0,1km <sup>2</sup> ; duração do impacto $\leq$ 1 mês; nenhum efeito ecológico
2-Pequeno	0,1km <sup>2</sup> < área afetada $\leq$ 1 km <sup>2</sup> ; 1 mês < duração do impacto $\leq$ 1 ano; inundação pode alterar a vegetação sem afetar muito a vida animal
3-Médio	1km <sup>2</sup> < área afetada $\leq$ 10 km <sup>2</sup> ; 1 ano < duração do impacto $\leq$ 10 anos; são afetadas diversas espécies animais
4-Alto	área afetada > 10 km <sup>2</sup> ; duração do impacto > 10 anos; importantes efeitos ecológicos

Fonte: Adaptado da LEI 12.334:2010 e LEI 14.066:20.

## 9.5 Cálculo do Resultado da Metodologia de Avaliação de Riscos para Reservatórios (MARR)

A MARR tem como resultado a média aritmética das variáveis dos quatro pilares, calculando o Índice da MARR (IMARR), conforme a equação 9:

$$\text{IMARR} = (\text{ANA} + \text{VER} + \text{ASS} + \text{EST} + \text{VOL} + \text{NTO} + \text{TUA} + \text{NPH} + \text{COA} + \text{PIGOI} + \text{DBO} + \text{NOD} + \text{COF} + \text{TEM} + \text{SDT} + \text{SAA} + \text{ETE} + \text{IEJ} + \text{ISJ} + \text{IAJ}) / 20$$

(9)

Após o cálculo do IMARR, procede-se à classificação do resultado.

Segundo o CCME (2001), o índice de qualidade IQA-CCME tem cinco classes, indo de excelente (95 a 100), bom (80 a 94), mediano (65 a 79), marginal (45 a 64) e ruim (0 a 44). O percentual respectivo de cada classe é o seguinte: excelente (6%), bom (15%), mediano (15%), marginal (20%) e ruim (44%).

O índice de qualidade IQA-CETESB tem quatro classes, indo de ótima (80 a 100), bom (52 a 79), regular (37 a 51) e imprópria (0 a 36) (CETESB, 2009). O percentual respectivo de cada classe é o seguinte: ótima (21%), bom (28%), regular



(15%) e imprópria (36%). Percebe-se então, que o IQA-CCME é mais restritivo que o IQA-CETESB, pois somando-se o percentual de valores possíveis “excelente” e “bom” do IQA-CCME resulta em 21% e “ótima” e “bom” do IQA-CETESB resulta em 49%. Além disso, a classe “ruim” do IQA-CCME é de 44% e “imprópria” no IQA-CETESB é de 36%.

A metodologia proposta por Rebelo (2009), definiu três classes para riscos: aceitáveis, intermediários e inaceitáveis, baseando-se numa escala qualitativa, segundo United Kingdom (1999; 2005).

O quadro 56 apresenta as 20 variáveis que fazem parte do IMARR com seus respectivos valores mínimo e máximo.

Quadro 56 - Variáveis do IMARR

Variáveis	Mínimo	Máximo
ANA	1	3
VER	1	3
ASS	1	3
EST	1	3
VOL	1	4
NTO	1	5
TUA	1	3
NPH	1	3
COA	1	2
PIGOI	1	2
DBO	1	2
NOD	1	2
COF	1	2
TEM	1	2
SDT	1	2
SAA	1	2
ETE	1	2
IEJ	1	4
ISJ	1	4
IAJ	1	4
TOTAL		57

Fonte: O autor, 2023.

Para o cálculo do IMARR definiu-se quatro classes, semelhante ao IQA-CETESB, pois verificando as classes “marginal” e “ruim” do IQA-CCME, os descritivos são muito semelhantes entre si. Além disso, optou-se por ser mais restritivo nas faixas de valores, à semelhança do IQA-CCME, isto é, a faixa “ótima” será, em termos percentuais, de 6%, “bom” de 15%, “regular” de 35% e “imprópria” de 44%.

Portanto, considerando a escala de 20 (20 variáveis x 1) a 57 (quadro 56) e arredondando para número inteiro, definiu-se o quadro 57.

Quadro 57 - Classes, escala e faixas do IMARR

Classes do IMARR	Escala	Faixas
Ótima	6% x 37 = 3	≤ 22
Boa	15% x 37 = 6	De 23 até 28
Regular	35% x 37 = 13	De 29 até 41
Imprópria	44% x 37 = 15	≥ 42

Fonte: O autor, 2023.

Deste modo, as definições das quatro classes do IMARR são apresentadas no quadro 58.

Quadro 58 - Índice da Metodologia de Avaliação de Riscos para Reservatórios (IMARR)

Classe	Faixa	Significado
1-Ótima	≤ 22	Ausência de ameaça ou virtual impacto; condições próximas aos níveis naturais
2-Boa	De 23 até 28	Existe um pequeno grau de ameaça ou impacto; as condições raramente divergem das condições naturais ou desejáveis
3-Regular	De 29 até 41	As condições podem ser ocasionalmente ameaçadas ou impactadas; as condições as vezes afastam-se dos níveis naturais ou desejáveis
4-Imprópria	≥ 42	As condições estão ameaçadas ou prejudicadas; as condições geralmente afastam-se dos níveis naturais ou desejáveis

Fonte: O autor, 2023.

Este capítulo apresentou a MARR, suas etapas, pilares, variáveis e pesos, além do cálculo do respectivo índice. O próximo capítulo trata da validação da MARR.

## 10 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE RISCOS PARA RESERVATÓRIOS (MARR)

Este capítulo trata da validação da MARR e seu indicador IMARR.

Os especialistas foram identificados no sentido de discutir a metodologia, tendo o propósito de sua validação. Foi então consultada a Superintendência de Gestão Ambiental da Eletrobras Furnas, a qual nomeou três especialistas, sendo um biólogo, uma química e um engenheiro ambiental. Estes profissionais auxiliaram na discussão e apontaram sugestões. Além disso, também foram consultados outros profissionais da empresa (Departamento de Segurança de Barragens e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil), além de profissionais da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e ainda alguns alunos da turma 2022 do ProfÁgua do polo UERJ, que poderiam colaborar com a sua visão de importância entre as variáveis. Deste modo, as formações dos respondentes foram bastante abrangentes, o que proporcionou uma visão mais robusta das pontuações, sendo que independente da formação, todos os respondentes são profissionais que possuem experiência com atuação em diversas áreas de recursos hídricos.

De acordo com Almeida (2021), a concentração dos parâmetros tem diferentes influências na qualidade da água. A escolha do determinante deve equilibrar a quantidade de parâmetros com a autenticidade dos dados e efetividade do índice. Os pesos devem exprimir a relação de importância do parâmetro na qualidade da água. A atribuição pode ser feita por consulta aos especialistas, com aplicação de diversas técnicas como *brainstorming*, *delphi*, entrevistas, dentre outras.

Primeiramente, a metodologia foi enviada por e-mail para os especialistas da Eletrobras Furnas, para que eles conhecessem a metodologia previamente. Foi agendada reunião presencial, para a verificação e discussão dos detalhes e sugestões, através de um *brainstorming* com todos de um mesmo departamento. Uma das sugestões levantadas na reunião foi que a metodologia deveria considerar diferentes pesos para as variáveis. Esta questão foi tratada através de entrevista na qual, foi elaborada uma planilha com as 20 variáveis da metodologia nas linhas e o peso de 1 a 5 nas colunas, devendo os entrevistados assinalarem qual o peso acreditavam ser o mais indicado para cada variável. O questionário da entrevista

utilizou uma escala de Likert de 1 a 5. O quadro 59 apresenta a definição dos pesos segundo a escala Likert. O *brainstormig* foi realizado com cada especialista dando as sugestões livremente, sem nenhuma questão ou perguntas definidas previamente. As sugestões foram anotadas e depois implementadas na dissertação.

Quadro 59 - Pesos do IMARR

Peso	Significado
1	Muito importante
2	Importante
3	Medianamente importante
4	Pouco importante
5	Menos importante perante as outras variáveis

Fonte: O autor, 2023.

Para os entrevistados do ProfÁgua, a planilha de pontuação das 20 variáveis foi encaminhada por e-mail. Para a ANA, o autor desta dissertação, aproveitando a oportunidade do V Seminário Nacional ProfÁgua que ocorreu em Brasília, nas instalações da ANA, de 13 a 16 de junho de 2023, entregou pessoalmente para diferentes especialistas que participavam do seminário. No último dia do evento, fez a coleta dos formulários preenchidos pelos especialistas da ANA.

O grupo multicêntrico dos respondentes foi bastante diversificado, com especialistas de diferentes formações, o que tornou a validação da metodologia e a definição dos pesos das variáveis ainda mais robusta. O quadro 60 apresenta as formações e quantidades dos especialistas que participaram da pesquisa.

Quadro 60 - Formação e quantidade de especialistas

Formação	Quantidade
Administração	1
Biologia	5
Economia	1
Engenharia Agrônômica	1
Engenharia Ambiental	2
Engenharia Civil	7
Engenharia Florestal	3
Engenharia Mecânica	1
Química	2
TOTAL	23

Fonte: O autor, 2023.

Após a aplicação das entrevistas, em que os respondentes pontuaram os pesos para cada uma das 20 variáveis, obteve-se a média da opinião dos especialistas que está apresentada no quadro 61. É importante registrar que os

pesos atribuídos pelos especialistas entraram no cálculo da média e então, manteve-se o anonimato entre os respondentes.

Os respondentes foram selecionados aleatoriamente quanto à formação e de várias empresas como Eletrobras Furnas, ANA, Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (AGEVAP), Caixa Econômica Federal, Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais (IVIMG/UFRJ) e WSP Global. No quadro 61, as variáveis estão na mesma ordem em que aparecem no capítulo anterior onde foram descritas e discutidas. A técnica *brainstorming* foi utilizada na discussão da metodologia e as entrevistas para a pontuação dos pesos, onde cada respondente preencheu a planilha e enviou por e-mail. Deste modo, foi eliminado o “viés” que teria se os pesos fossem dados usando o *brainstorming*, pois como as entrevistas foram individuais, os respondentes não se conheceram e cada um preencheu a planilha isoladamente, o que reduziu a influência de outros respondentes.

Quadro 61 - Votos por relevância (continua)

Variável	Respondentes																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Altura do nível d'água (ANA)	1	2	2	3	3	2	2	2	3	3	4	1	1	1	1	3	3	1	4	1	2	1	1
Velocidade do rio (VER)	2	3	4	4	4	2	2	5	4	3	4	1	1	1	1	1	3	1	4	2	2	2	1
Assoreamento ou acúmulo de sedimentos (ASS)	2	1	3	3	2	2	1	4	3	2	2	1	2	1	1	1	1	1	2	2	3	2	1
Estabilidade de taludes (EST)	3	2	3	3	2	3	1	3	2	2	3	1	2	1	1	3	1	1	3	2	1	2	2
Volume do reservatório (VOL)	3	2	2	3	3	2	3	3	2	4	2	1	1	2	1	2	4	1	3	4	2	3	1
Nível de toxicidade em organismos aquáticos (NTO)	3	1	2	3	1	1	3	2	3	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	3	2
Turbidez da água (TUA)	3	2	2	4	2	1	3	3	2	5	2	1	2	2	2	1	2	1	1	3	3	2	1
Nível de pH (NPH)	2	2	2	2	3	1	3	2	4	3	3	1	2	2	2	1	3	1	1	3	2	2	2
Cor da água (COA)	3	2	2	4	2	1	4	4	1	5	3	2	2	1	3	1	3	2	2	3	4	2	2
Presença de indicadores geoquímicos, orgânicos e inorgânicos (PIGOI)	2	1	2	2	1	1	3	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	5
Nível de demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	2	2	2	3	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	2	5

Fonte: O autor, 2023.

Quadro 61 - Votos por relevância (conclusão)

Variável	Respondentes																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Nível de oxigênio dissolvido (NOD)	1	2	2	1	1	1	3	1	2	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	2	5
Coliformes fecais (COF)	2	3	2	2	1	1	3	2	3	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	3	1	2	2
Temperatura (TEM)	1	2	2	3	4	2	5	3	3	5	1	2	4	2	2	1	3	2	2	2	4	3	3
Sólidos dissolvidos totais (SDT)	3	3	2	4	3	1	4	3	4	5	2	2	2	2	1	1	2	2	2	3	3	3	4
Existência ou não de sistemas de aviso e alerta (SAA)	5	2	2	2	2	2	2	2	2	4	2	1	2	2	1	2	5	1	2	2	2	3	1
Existência ou não de tratamento de esgoto (ETE)	2	1	2	1	1	1	2	2	2	4	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1
Impacto econômico a jusante (IEJ)	5	2	2	3	2	2	2	2	2	3	2	1	1	3	1	2	5	1	3	2	1	2	1
Impacto social a jusante (ISJ)	5	3	2	2	2	1	2	2	2	1	2	1	1	3	1	2	4	1	3	2	1	2	1
Impacto ambiental a jusante (IAJ)	5	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	3	1	3	2	1	2	1

Fonte: O autor, 2023.

A agregação de subíndices através do Índice de Soma Linear como detalhado no capítulo anterior, é composto pela adição de subíndices sem pesos. Esta técnica é mais simples, mas tem a desvantagem de provocar qualificação de água insatisfatória. Quando todos os parâmetros estão atendendo aos limites estabelecidos, os somatórios podem exceder ao valor permissível, mesmo que nenhum dos subíndices exceda, gerando o problema da “ambiguidade”. Por esse motivo, optou-se pelo Índice Multiplicativo, que é a função de agregação de multiplicação mais comum, calculando-se o produto de pesos, que elimina o problema de “eclipse”, pois um índice é zero se qualquer subíndice é zero, e, também elimina a “ambiguidade”, pois o índice será zero, se e somente se, pelo menos um subíndice for zero. Isto significa que se qualquer subíndice exibir qualidade de água insatisfatória, o índice global exibirá qualidade insatisfatória (ALMEIDA, 2021).

Para corroborar os resultados obtidos no *brainstormig* e nas entrevistas foram analisadas sete dissertações do ProfÁgua da UERJ no sentido de verificar se os resultados obtidos nesta dissertação foram de alguma maneira semelhantes aos resultados encontrados por outros estudos quanto às variáveis consideradas nas

pesquisas. O quadro 62 apresenta as dissertações analisadas, com seus autores, professores orientadores, variáveis e pesos atribuídos em cada estudo.

Quadro 62 - Dissertações do ProfªÁgua UERJ analisadas

Dissertação/Título	Autor	Ano	Orientador(a) / Coorientador(a)	Variáveis/Pesos
Estudo comparativo da utilização do IQA-NSF e IQA-CCME para análise da qualidade da água no estado do Rio de Janeiro	Silveira, Livia Garcia	2018	Cláudia Hamacher / Luciene P. Silva	NOD=0,17; COF=0,16; NPH=0,11; DBO=0,11; TEM=0,10; Nitrato=0,10; Fosforo=0,10; TUA=0,08; SDT=0,07
Panorama atual do monitoramento da qualidade das águas e do uso de índices no Brasil. Estudo de caso: Ribeirão da Mata – Aplicação do IQA-CCME	Ferreira, Ana Paula Viana	2019	Cláudia Hamacher	NOD=0,17; E. COLI=0,15; NPH=0,12; DBO=0,10; Nitrato=0,10; Fosforo=0,10; TEM=0,10; TUA=0,08; SDT=0,08
Qualidade da água no reservatório de lajes: Ocorrências de Cianobactérias e Cianotoxinas	Kauffman, Marcelo	2021	Friedrich Herms	NOD=17; Clorofila a =15; Fósforo=12; DQO=12; N=8; Cianobactérias=8
Qualidade da água na lagoa de Jacarepaguá - Rio de Janeiro - RJ: aquisição de informações através do uso de técnicas de sensoriamento remoto	Kaliki, Marco Antônio Gonçalves da Silva	2021	Francisco Dourado	TEM; CE; Densidade, Radioatividade; TUA, COA; Clorofila a; SDT
Avaliação histórica da qualidade da bacia representativa do rio Piabanha através de Índices de Qualidade da Água	Lima, Sheila Carolina de Miranda	2021	Cláudia Hamacher / Mariana D. Boas	COF=0,16; DBO=0,11; Fosfato=0,10; Nitrato=0,10; NOD=0,17;NPH=0,11; SDT=0,07; TEM=0,10; TUA=0,08
Avaliação da evolução da qualidade da água superficial na bacia do Rio Pomba, MG, utilizando o índice IQA-CCME	Silva, Hernane Teixeira da	2021	Friedrich Herms	Al; DBO; Dureza; E.Coli; Fenóis; Ferro; Fosforo; Manganês; Nitrato; Nitrito; N; NOD; NPH; SDT; TUA
Qualidade da água bruta e tratada nos municípios Resende, Porto Real, Barra Mansa, Volta Redonda e Pinheiral, abastecidos pelo rio Paraíba do Sul	Azevedo, Jardel Souza de	2021	Cássia Freitas / Cláudia Hamacher	COA; TUA; NPH; Alcalinidade; Dureza; Fluoretos; Cloretos; Cloro; CO <sub>2</sub> ; COF; TEM

Fonte: O autor, 2023.

Segundo Almeida (2021), o indicador da relevância é calculado como a média aritmética da somatória da multiplicação da quantidade de votos do parâmetro vezes a significância atribuída ao parâmetro, adotando-se o valor numérico decrescente da maior significância [=1] para a menor significância [= 5]. A equação 9 apresenta o cálculo.

$$\text{Peso médio} = (N^{\circ} \text{ notas "1"} \times \text{Peso "1"}) + (N^{\circ} \text{ notas "2"} \times \text{Peso "2"}) + (N^{\circ} \text{ notas "3"} \times \text{Peso "3"}) + (N^{\circ} \text{ notas "4"} \times \text{Peso "4"}) + (N^{\circ} \text{ notas "5"} \times \text{Peso "5"}) / \text{Total respostas}$$

(9)

O quadro 63 apresenta o peso médio da pontuação das variáveis.

Quadro 63 - Média da pontuação das variáveis

Variável	Quantidade de votos por relevância					Peso Médio
	1	2	3	4	5	
Altura do nível d'água (ANA)	9	6	6	2		2,04
Velocidade do rio (VER)	7	6	3	6	1	2,48
Assoreamento ou acúmulo de sedimentos (ASS)	9	9	4	1		1,87
Estabilidade de taludes (EST)	7	8	8			2,04
Volume do reservatório (VOL)	5	8	7	3		2,35
Nível de toxicidade em organismos aquáticos (NTO)	11	6	6			1,78
Turbidez da água (TUA)	6	10	5	1	1	2,17
Nível de pH (NPH)	5	11	6	1		2,13
Cor da água (COA)	4	9	5	4		2,30
Presença de indicadores geoquímicos, orgânicos e inorgânicos (PIGOI)	14	7	1		1	1,57
Nível de demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	13	7	2		1	1,65
Nível de oxigênio dissolvido (NOD)	12	9	1		1	1,65
Coliformes fecais (COF)	8	11	4			1,83
Temperatura (TEM)	3	9	6	3	2	2,65
Sólidos dissolvidos totais (SDT)	3	8	7	4	1	2,65
Existência ou não de sistemas de aviso e alerta (SAA)	4	15	1	1	2	2,22
Existência ou não de tratamento de esgoto (ETE)	15	6	1	1		1,48
Impacto econômico a jusante (IEJ)	6	11	4		2	2,17
Impacto social a jusante (ISJ)	8	10	3	1	1	2,00
Impacto ambiental a jusante (IAJ)	9	11	2		1	1,83

Fonte: O autor, 2023.

Por exemplo, o cálculo do peso médio da variável ANA (Altura do Nível de Água) é:

$$\text{Peso médio}_{ANA} = ((9 \times 1) + (6 \times 2) + (6 \times 3) + (2 \times 4) + (0 \times 5)) / 23 = 2,04$$

Para a conversão em pesos, foi atribuído um peso temporário (1,0) ao parâmetro que recebeu a avaliação de significação mais alta, isto é, aquele que obteve o valor 1 (mais alta significação) na escala decrescente de importância (ETE). Todos os outros pesos temporários foram obtidos dividindo cada avaliação média individual pela avaliação mais alta. Posteriormente, cada peso temporário foi dividido pela soma de todos os pesos temporários para chegar ao peso final. A equação 10 apresenta o cálculo do peso temporário para cada variável.

Peso Temporário = Média da variável de maior significado / média da variável (10)

Por exemplo, para a variável PIGOI (Presença de Indicadores Geoquímicos, Orgânicos e Inorgânicos), o cálculo é o seguinte:

$$\text{Peso Temporário}_{PIGOI} = 1,48 / 1,57 = 0,94$$

O peso final é calculado pela divisão do peso temporário da variável pelo somatório dos pesos. A equação 11 apresenta o cálculo do peso final de cada variável.



$$\text{Peso Final} = \text{Peso temporário da variável} / \sum \text{Pesos temporários} \quad (11)$$

Por exemplo, para a variável PIGOI, o cálculo é o seguinte:

$$\text{Peso Final}_{\text{PIGOI}} = 0,94 / 14,86 = 0,06$$

O quadro 64 apresenta, em ordem crescente da variável de maior importância para a de menor, o peso médio, pesos temporários e pesos finais das variáveis.

Quadro 64 - Peso médio, pesos temporários e finais das variáveis

Variável	Peso Médio	Peso Temporário	Peso Final
Existência ou não de tratamento de esgoto (ETE)	1,48	1,00	0,07
Presença de indicadores geoquímicos, orgânicos e inorgânicos (PIGOI)	1,57	0,94	0,06
Nível de demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	1,65	0,90	0,06
Nível de oxigênio dissolvido (NOD)	1,65	0,90	0,06
Nível de toxicidade em organismos aquáticos (NTO)	1,78	0,83	0,06
Coliformes fecais (COF)	1,83	0,81	0,05
Impacto ambiental a jusante (IAJ)	1,83	0,81	0,05
Assoreamento ou acúmulo de sedimentos (ASS)	1,87	0,79	0,05
Impacto social a jusante (ISJ)	2,00	0,74	0,05
Altura do nível d'água (ANA)	2,04	0,72	0,05
Estabilidade de taludes (EST)	2,04	0,72	0,05
Nível de pH (NPH)	2,13	0,69	0,05
Turbidez da água (TUA)	2,17	0,68	0,05
Impacto econômico a jusante (IEJ)	2,17	0,68	0,05
Existência ou não de sistemas de aviso e alerta (SAA)	2,22	0,67	0,04
Cor da água (COA)	2,30	0,64	0,04
Volume do reservatório (VOL)	2,35	0,63	0,04
Velocidade do rio (VER)	2,48	0,60	0,04
Temperatura (TEM)	2,65	0,56	0,04
Sólidos dissolvidos totais (SDT)	2,65	0,56	0,04
TOTAL		14,86	1,00

Fonte: O autor, 2023.

Observando o quadro 64 (pesos médios, temporários e finais) e 62 (dissertações do Prof.ª UERJ analisadas), verifica-se que as variáveis DBO, NOD, COF e PIGOI estão na parte de cima entre as seis variáveis mais representativas, como as de maior peso de importância em relação às outras, sugerindo que as dissertações do Prof.ª UERJ apresentadas no quadro 62 corroboram de certa maneira o nível de importância dos pesos finais dessa dissertação (quadro 64), no que se refere à ordem das variáveis dessa pesquisa que foram validadas pelos especialistas. Percebe-se ainda, que as variáveis que fazem parte desta dissertação, NPH, TEM, TUA, SDT e COA também foram citadas na maior parte dos estudos e pesquisas analisadas.

Silveira (2018) argumenta que apesar das limitações encontradas, o IQA-CCME mostrou-se eficaz na indicação da qualidade das águas, existindo uma

coerência e correlação com o IQA-NSF, com “coeficiente de determinação” de aproximadamente 90 %.

Deste modo, considerou-se a utilização do Índice Multiplicativo, que elimina o problema de “eclipse” e da “ambiguidade”, onde o IMARR é calculado pelo peso final elevado exponencialmente ao peso de cada variável. A equação 12 apresenta o cálculo do IMARR.

$$\text{IMARR} = \sum \text{Nota}^{\text{Peso Final}} = \text{Nota Máxima}^{\text{Peso Final}} \quad (11)$$

O quadro 65 apresenta o peso final, a nota máxima e mínima e o IMARR máximo e mínimo. A nota máxima é dada pela nota mais alta possível segundo os critérios de cada variável e o IMARR máximo é calculado pela nota mais alta de cada variável elevado exponencialmente ao seu peso final. Pelo quadro 65, verifica-se que o IMARR máximo será 20,99.

Por exemplo, para a variável PIGOI, o cálculo é o seguinte:

$$\text{IMARR}_{\text{PIGOI}} = 2^{0,06} = 1,04$$

Quadro 65 - Nota mínima, máxima e IMARR

Variável	Peso Final (Quadro 59)	Nota mínima	Nota máxima	IMARR mínimo	IMARR máximo
Existência ou não de tratamento de esgoto (ETE)	0,07	1	2	1,00	1,05
Presença de indicadores geoquímicos, orgânicos e inorgânicos (PIGOI)	0,06	1	2	1,00	1,04
Nível de demanda bioquímica de oxigênio (DBO)		1	2		1,04
Nível de oxigênio dissolvido (NOD)		1	2		1,04
Nível de toxicidade em organismos aquáticos (NTO)		1	5		1,09
Coliformes fecais (COF)	0,05	1	2	1,00	1,04
Impacto ambiental a jusante (IAJ)		1	4		1,08
Assoreamento ou acúmulo de sedimentos (ASS)		1	3		1,06
Impacto social a jusante (ISJ)		1	4		1,07
Altura do nível d'água (ANA)		1	3		1,06
Estabilidade de taludes (EST)		1	3		1,06
Nível de pH (NPH)		1	3		1,05
Turbidez da água (TUA)		1	3		1,05
Impacto econômico a jusante (IEJ)	1	4	1,07		
Existência ou não de sistemas de aviso e alerta (SAA)	0,04	1	2	1,00	1,03
Cor da água (COA)		1	2		1,03
Volume do reservatório (VOL)		1	2		1,03
Velocidade do rio (VER)		1	3		1,05
Temperatura (TEM)		1	2		1,03
Sólidos dissolvidos totais (SDT)		1	2		1,03
TOTAL	1,00	20		20,00	20,99

Fonte: O autor, 2023.

Para a classificação final do IMARR foi observada a proporcionalidade do IQA-NSF, que utiliza as classes “água excelente” (91 a 100 = 10%); “boa” (71 a 90 = 20%); “mediana” (51 a 70 = 20%); “razoável” (26 a 50 = 25%); “ruim” (0 a 25 = 25%).

As classes “mediana” e “razoável” tem o significado muito próximo na visão de riscos, e, portanto, no IMARR, serão consideradas a mesma classe “regular”, perfazendo um percentual de  $20\% + 25\% = 45\%$ . Considerando que a nota mínima das 20 variáveis é 1, o que totaliza IMARR mínimo de 20,00, e que IMARR máximo totaliza 20,99, tem-se que a diferença entre o maior e o menor é de 0,99. Para esta dissertação, quanto maior o IMARR, pior o indicador.

Nesse sentido, a escala final do IMARR com as quatro classes é apresentada no quadro 66.

Quadro 66 - Classes, escala e faixas finais do IMARR

Classes do IMARR	Escala	Faixas
Ótima	$10\% \times 0,99 = 0,10$	$\leq 20,06$
Boa	$20\% \times 0,99 = 0,20$	De 20,07 até 20,27
Regular	$45\% \times 0,99 = 0,45$	De 20,28 até 20,73
Imprópria	$25\% \times 0,99 = 0,25$	$\geq 20,74$

Fonte: O autor, 2023.

Considerando uma escala mais compreensível, fez-se a normalização, tendo por base a menor nota “0” (zero) e a maior nota “100”. Portanto, a diferença é de 100. Definiu-se o quadro 67 que apresenta as faixas de valores normalizados.

Quadro 67 - Classes, escala e faixas finais normalizadas do IMARR

Classes do IMARR	Escala	Faixas Normalizadas (IMARR)
Ótima	$10\% \times 100 = 10$	$IMARR \leq 10$
Boa	$20\% \times 100 = 20$	$11 \leq IMARR \leq 29$
Regular	$45\% \times 100 = 45$	$30 \leq IMARR \leq 74$
Imprópria	$25\% \times 100 = 25$	$IMARR \geq 75$

Fonte: O autor, 2023.

Deste modo, as definições das quatro classes do IMARR são apresentadas no quadro 68.

Quadro 68 - Índice Atualizado da Metodologia de Avaliação de Riscos para Reservatórios (IMARR)

Classe do IMARR	Faixas	Significado
1-Ótima	$IMARR \leq 10$	Ausência de ameaça ou virtual impacto; condições próximas aos níveis naturais
2-Boa	$11 \leq IMARR \leq 29$	Existe um pequeno grau de ameaça ou impacto; as condições raramente divergem das condições naturais ou desejáveis
3-Regular	$30 \leq IMARR \leq 74$	As condições podem ser ocasionalmente ameaçadas ou impactadas; as condições as vezes afastam-se dos níveis naturais ou desejáveis
4-Imprópria	$IMARR \geq 75$	As condições estão ameaçadas ou prejudicadas; as condições geralmente afastam-se dos níveis naturais ou desejáveis

Fonte: O autor, 2023.

Foi elaborada uma planilha MS-Excel para automatização completa da MARR e do IMARR que se encontra no Apêndice desta dissertação. Deste modo, o último objetivo específico foi alcançado.

Este capítulo tratou da validação da MARR, aplicação das técnicas *brainstorming* e entrevistas, aplicação da planilha de cálculo para levantamento dos pesos na visão dos respondentes, comparação das variáveis com outras dissertações do Prof.Água UERJ, cálculo do IMARR e definição de sua classe, faixas de valores significado e normalização das faixas. O próximo capítulo trata das considerações finais.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral (Desenvolver Metodologia de Avaliação de Riscos para Reservatórios - MARR) e os objetivos específicos (Elaborar Metodologia de Avaliação para Segurança de Barragens da Eletrobras Furnas, Elaborar *Frameworks* de Análise de Riscos e Elaborar planilha automatizada para cálculo da MARR e IMARR) foram alcançados.

A principal contribuição da dissertação é a elaboração da MARR que permitirá uma análise dos riscos de um determinado recurso hídrico, podendo servir como entrada e justificativa para ações necessárias de infraestrutura a serem realizadas pelo Estado, Comitês e Agências de Bacia Hidrográfica. Além disso, a metodologia e os *frameworks* poderão servir como embasamento das políticas públicas de recursos hídricos, no sentido de apoiar o planejamento dessas políticas, facilitando a compreensão dos aspectos de riscos com suas causas, consequências e tratamentos, de modo a permitir a priorização das ações necessárias à implementação das políticas públicas.

Outras contribuições foram a identificação dos riscos de forma organizada em *frameworks* que podem servir para qualquer recurso hídrico; a planilha automatizada de cálculo da metodologia e a metodologia de avaliação para segurança de barragens.

A empresa Eletrobrás Furnas, onde o autor desta pesquisa trabalhou, tem interesse, particularmente, nos reservatórios de suas Usinas Hidroelétricas (UHE) e portanto, esta pesquisa auxilia nessa direção.

Visando a continuidade e possibilidade de trabalhos futuros, como sugestão é a aplicação da MARR em vários reservatórios e utilização em conjunto com a planilha de automatização do cálculo do IMARR que facilita a aplicação na prática da metodologia.

Outra oportunidade para futuros trabalhos é a aplicação e desenvolvimento de um modelo multicritério no sentido de tornar a metodologia mais precisa e robusta do ponto de vista matemático e estatístico.

Como limitação da dissertação, devido ao universo possível de riscos que podem afetar os recursos hídricos, nem todos os riscos de recursos hídricos foram identificados, pois o universo de possibilidades e variáveis é muito grande,

principalmente porque envolve variáveis relativas à qualidade e quantidade de água. Além disso, existem inúmeras áreas do conhecimento, como hidrologia, hidráulica, biologia, química, geologia, engenharia ambiental e outras que estão relacionadas aos riscos que podem impactar os recursos hídricos, de modo que, é muito difícil englobar em uma única metodologia todas as possíveis variáveis. Desse modo, procurou-se englobar aquelas variáveis que a maioria dos autores e instituições relacionadas ao tema, utilizam em seus estudos ou relatórios. Outra limitação é quanto ao enquadramento dos corpos d'água, não sendo considerados a classe 4, que é destinada apenas à navegação e harmonia paisagística.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 31000: Gestão de Riscos – Diretrizes. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

AFONSO, José Rocha. Curso de Exploração e Segurança de Barragens. Lisboa: Associação Portuguesa do Ambiente/Laboratório Nacional de Engenharia Civil (APA/LNEC), 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Panorama da qualidade das águas superficiais no Brasil. Brasília: ANA, 2005. Disponível em: [http://portalpnqa.ana.gov.br/Publicacao/PANORAMA\\_DA\\_QUALIDADE\\_DAS\\_AGUA\\_S.pdf](http://portalpnqa.ana.gov.br/Publicacao/PANORAMA_DA_QUALIDADE_DAS_AGUA_S.pdf) Acesso em: 22 fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Indicadores de Qualidade: Índice de Qualidade das Águas (IQA). Brasília: ANA, 2005. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx>. Acesso em: 22 fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Orientações para atualização das curvas cota x área x volume. Brasília: ANA, Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Relatório de Segurança de Barragens-RSB. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2017/rsb-2017-versao-enviada-ao-cnrh.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Avaliação dos efeitos da implantação de AHEs na RH Paraguai. Brasília: ANA, 2020. Disponível em: [https://www.imasul.ms.gov.br/wp-content/uploads/2020/09/AHEs\\_Paraguai\\_25AGO20\\_MS.pdf](https://www.imasul.ms.gov.br/wp-content/uploads/2020/09/AHEs_Paraguai_25AGO20_MS.pdf). Acesso em: 22 fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Atlas Águas: Segurança hídrica do abastecimento urbano. Brasília: ANA, 2021. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/1d27ae7adb7f4baeb224d5893cc21730>. Acesso em: 22 fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Fortalecimento dos entes do SINGREH. Brasília: ANA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/fortalecimento-dos-entes-do-singreh>. Acesso em: 20 out. 2022.

ALMEIDA, Rosa Alencar Santana de. Índices de qualidade de água. Cruz das Almas-BA: EDUFRB, 2021. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB.

ALMEIDA, A. B.; RAMOS, C. M.; SANTOS, M. A.; VISEU, T. Dam break Flood Risk Management in Portugal. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, 265 p., 2003.

ALMEIDA, Lutiane Queiroz de; WELLE, Torsten; BIRKMANN, Jorn. Disaster risk indicators in Brazil: A proposal based on the world risk index. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 17, p. 251-272, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.04.007>. Acesso em: 20 out. 2022.

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS - ACGIH. Disponível em: <https://www.acgih.org/>. Acesso em: 16 mar. 2023.

ASSIS, André Pacheco; FRANCIS, Fernando Olavo; JÚNIOR ROQUE, Rabechini. *Gestão de Riscos: Empreendimentos Complexos*. Curitiba: Editora CRV, 2019.

AUSTRALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS. *Guidelines on risk assessment*. ANCOLD Working Group, 1994.

AUTORIDADE DE SEGURANÇA ALIMENTAR E ECONÔMICA – ASAE. República Portuguesa. Disponível em: <https://www.asae.gov.pt/seguranca-alimentar/riscos-quimicos/haps/principal-legislacao.aspx>. Acesso em: 16 mar. 2023.

AVEN, T. An emerging new risk analysis science: Foundations and Implications. *Risk Analysis*, 38, 2018, p. 876-888. DOI: 10.1111/risa.12899.

AZEVEDO, Jardel Souza de. *Qualidade da água bruta e tratada nos municípios Resende, Porto Real, Barra Mansa, Volta Redonda e Pinheiral, abastecidos pelo rio Paraíba do Sul*. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia e Ciências – CTC, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.bdttd.uerj.br:8443/handle/1/18608>. Acesso em: 02 fev. 2023.

BAECHER, G. B.; CHRISTIAN, J. T. *The practice of risk analysis and the safety of dams*. p.29, 2000.

BARBOSA JÚNIOR, Antenor R. *Hidrologia aplicada: Regularização de vazão*. Porto Alegre: McGraw Hill, 1975. Disponível em: [https://www.estantevirtual.com.br/llivros/swami-marcondes-villela-e-arth-hidrologia-aplicada-3131816266?gclid=Cj0KCQiA3eGfBhCeARIsACpJNU\\_YWiOhDhyiEp8qOYrE6CHs5-aumXXK0OYIWEgiB\\_4bdQg4pKZCA1QaAoAnEALw\\_wcB](https://www.estantevirtual.com.br/llivros/swami-marcondes-villela-e-arth-hidrologia-aplicada-3131816266?gclid=Cj0KCQiA3eGfBhCeARIsACpJNU_YWiOhDhyiEp8qOYrE6CHs5-aumXXK0OYIWEgiB_4bdQg4pKZCA1QaAoAnEALw_wcB). Acesso em: 24 fev. 2023.

BC HYDRO. *Alternatives for the Canadian Entitlement*. Columbia Report 4. Vancouver: Downstream Benefits Committee. 1993.

BERNSTEIN, Peter Lewyn. *Desafio aos deuses: a fascinante história do risco*. Rio de Janeiro: Alta Books, 2019. 400 p.

BIRKMANN, J. *Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies*. Tokyo, Japan: United Nations University Press, 450 pp., 2006.



BIRKMANN, J.; WELLE, T.; KRAUSE, D.; WOLFERTZ, J.; CATALINA SUAREZ, D.; SETIADI, N. World Risk Index: Concept and Results. In: World Risk Report 2011. Alliance Development Works, p. 13-42, ISBN 978-3-9814495-1-8.

BOHOLM, M. How do Swedish Government agencies define risk? Journal of Risk Research. ISSN 1366-9877, 18 p., jan 2018.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação de corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes e outras providências. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 2005. Disponível em: [https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res\\_conama\\_357\\_2005\\_classificacao\\_corpos\\_agua\\_rtfcd\\_a\\_altrd\\_res\\_393\\_2007\\_397\\_2008\\_410\\_2009\\_430\\_2011.pdf](https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_a_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf). Acesso em: 22 fev. 2023.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 396 de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA e outras providências. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 2011a. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>. Acesso em: 23 fev.2023.

BRASIL. Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União, Poder Legislativo, Brasília, DF, 1997. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9433.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm). Acesso em: 23 fev.2023.

BRASIL. Lei 12.334:2010. Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial da União, Poder Legislativo, Brasília, DF, 2010. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm). Acesso em: 8 out.2022.

BRASIL. Lei 13.303:2016. Lei Federal nº 13.303 de 30 de junho de 2016. Dispõe sobre o estatuto jurídico da empresa pública, da sociedade de economia mista e de suas subsidiárias, no âmbito da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos

Municípios. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2016/lei/l13303.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/lei/l13303.htm). Acesso em: 8 out. 2022.

BRASIL. Lei 14.066:2020. Lei Federal nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Diário Oficial da União, Poder Legislativo, Brasília, DF, 2020. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm). Acesso em: 8 out. 2022.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2030. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME, EPE, 2007.

BRASIL. Portaria nº 5, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das Normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Brasília. Disponível em: [https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005\\_03\\_10\\_2017.html](https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005_03_10_2017.html). Acesso em: 23 fev.2023.

BRASIL ESCOLA. Demanda Bioquímica de Oxigênio. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/demanda-bioquimica-oxigenio.htm>. Acesso em: 22 fev. 2023.

BRITO, Romualdo José Romão. Análise da aeração em escoamentos de altas velocidades em calhas de vertedores. 2011. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. doi:10.11606/D.18.2011.tde-30032011-090539. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-30032011-090539/pt-br.php>. Acesso em: 2023-02-28.

BROWN, Robert M.; MCCLELLAND, Nina I.; DEININGER, Rolf A.; O'CONNOR, Michael F. A Water Quality Index: Crashing the Psychological Barrier. In: Indicators of Environmental Quality. [s.l: s.n.]. DOI: 10.1007/978-1-4684-1698-5\_15. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Water-Quality-Index-%E2%80%94-Crashing-the-Psychological-Brown-McClelland/702f124e41ea62805e68f3b075658cc2b810be52>. Acesso em: 22 fev. 2023.

C. JUNIOR, H.S. Procedimentos Progressivos Analíticos e Numéricos para Análise de Barragens em Arco. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/9845>. Acesso em: 28 out. 2022.

CALDEIRA, L. M. M. S. Análises de riscos em geotecnia: aplicação a barragens de aterro. Lisboa: LNEC, 248 p., 2008.

CALIFORNIA WATER BOARDS. Draft final White paper discussion on: identification of risk assessment 2.0 indicators for public water systems. July 16, 2020. Disponível em:

[https://www.waterboards.ca.gov/drinking\\_water/programs/safer\\_drinking\\_water/docs/draft\\_white\\_paper\\_indicators\\_for\\_risk\\_assessment\\_07\\_15\\_2020\\_final.pdf](https://www.waterboards.ca.gov/drinking_water/programs/safer_drinking_water/docs/draft_white_paper_indicators_for_risk_assessment_07_15_2020_final.pdf). Acesso em: 22 fev. 2023.

CANADIAN DAM ASSOCIATION. Dam Safety Guidelines. CDA. Toronto: CDA, 82 p., 2007.

CARVALHO, Daniel Magalhães de. Geração Elétrica e Mudanças Climáticas: Avaliação Econômico-Financeira de Usinas Hidroelétricas a Fio D'Água no Rio Tapajós. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: [efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/http://www.ppe.ufrj.br/images/publicações/mestrado/DanielCarvalho.\\_MESTRADO-2019.pdf](efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/http://www.ppe.ufrj.br/images/publicações/mestrado/DanielCarvalho._MESTRADO-2019.pdf). Acesso em: 2022-10-20.

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JR.; SANTOS, P. M. C; LIMA, J. E. F. W. Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios. Brasília: ANEEL, 132 p., 2000. Disponível em: <https://silo.tips/download/guia-de-avaliaao-de-assoreamento-de-reservatorios>. Acesso em: 2022-10-20.

CARVALHO, N. O. Hidrossedimentologia prática. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

CASTRO, Ana Maria Vieira de; QUEIROZ, Ângela Lima Meneses de; ARAÚJO, Elba Luciene Bezerra de; NASCIMENTO, Geannie Shirley Melo do; JESUS, Inessa Adolfo de; VASCONCELOS, Maria Amélia de Araújo; CABRAL, Teresa Maria de Almeida; NASCIMENTO, Gilvan Geremias do. Parâmetros microbiológicos de águas de rios coletadas em alguns municípios da Paraíba. X Encontro de Iniciação à docência. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa: 2007.

CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT - CCME. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index 1.0. Technical Report. Canada, 2001. 13 f. Disponível em: [http://www.ccme.ca/assets/pdf/wqi\\_techrprtftsht\\_e.pdf](http://www.ccme.ca/assets/pdf/wqi_techrprtftsht_e.pdf). Acesso em: 24 fev. 2023.

CERVI, Eduardo Cimino. Avaliação da qualidade de sedimentos do reservatório Bilings-SP por meio de linhas de evidências químicas e ecotoxicológicas. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: <efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/td-e-29052017-155244/publico/TeseEduardoCiminoCervi.pdf>. Acesso em: 2022-10-28.

COLLE, G. de A. Metodologias de Análise de Risco para Classificação de Barragens segundo a Segurança. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos

e Ambiental) - Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

Disponível em:

[efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/19150/Metodologias%20de%20analise%20de%20risco%20para%20classificacao%20de%20barra.pdf?sequence=1](https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/19150/Metodologias%20de%20analise%20de%20risco%20para%20classificacao%20de%20barra.pdf?sequence=1). Acesso em: 2022-10-28.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Mortandade de peixes, São Paulo: 2022a. Disponível em:

<https://cetesb.sp.gov.br/mortandade-peixes/alteracoes-fisicas-e-quimicas/ph/>.

Acesso em: 22 nov. 2022.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Mortandade de peixes, São Paulo: 2022b. Disponível em:

<https://cetesb.sp.gov.br/mortandade-peixes/alteracoes-fisicas-e-quimicas/temperatura-da-agua/>. Acesso em: 24 fev. 2023.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo. Relatório Técnico. São Paulo, 2009. 44 p.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO – SABESP. Disponível em:

<https://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=40>. Acesso em: 22 nov. 2022.

COMUNIDADE ECONÔMICA EUROPEIA. Directiva 67/548/CEE do Conselho, de 27 de junho de 1967: JO 196, 1967-08-16, p.1–98, 1967.

CONROW, E. H.; SHISHIDO, P. S. Implementing risk management on software intensive projects. *IEEE Software*, 14(3), 83-89. doi:10.1109/52.589242, p. 83-89, 1997.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS – CNRH. Conjunto de normas legais: Recursos Hídricos. Ministério do Meio Ambiente, 8 ed. 2012, 682 p.

CONSUMER PRODUCTS SAFETY & QUALITY UNIT – ESIS. European chemical Substances Information System. Disponível em: <http://ecb.jrc.ec.europa.eu/esis/>.

Acesso em: 22 fev. 2023.

CYGANIEWICZ, J. M.; SMART, J. D. U.S. Bureau of Reclamation's use of risk analysis and risk assessment in dam safety decision making. In: *International Congress on Large Dams*, 20, Beijing. Twentieth international congress on large dams – Proceedings, Paris: ICOLD, v. 01, p. 351-369, 2000.

DIAS, G. G. Proposta de metodologia de avaliação qualitativa da segurança de barragens com base no risco. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010, 121 p.

DINIUS, S. H. Design of an index of water quality. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, [S. l.], 1987. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1987.tb02959.x. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1752-1688.1987.tb02959.x>. Acesso em: 22 fev. 2023.

DOURADO, Francisco. Notas de aula. Disciplina: Desastres naturais e quantificação do risco, Profagua – Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, 2023.

ECONOMIST.COM. 29.ago.2017. Disponível em: <https://www.economist.com/graphic-detail/2017/08/29/weather-related-disasters-are-increasing>. Acesso em: 19 out. 2022.

ELETROBRAS. Política de Gestão de Riscos das Empresas Eletrobras. Edição 5.0. 18/06/2021. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://eletrobras.com/pt/GestaoeGovernancaCorporativa/Pol%C3%ADtica\\_de\\_Gestao\\_de\\_Riscos\\_POL-11.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://eletrobras.com/pt/GestaoeGovernancaCorporativa/Pol%C3%ADtica_de_Gestao_de_Riscos_POL-11.pdf). Acesso em: 08 out. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Relatório Síntese 2022. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN\\_Síntese\\_2022\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_Síntese_2022_PT.pdf). Acesso em: 11 out. 2022.

ERM Insights. Disponível em: <https://www.erm insightsbycarol.com/coso-erm-framework/>. Acesso em: 20 out. 2022.

FELL, R. Landslide risk assessment and allowable risk. Canadian Geotechnical Journal. v. 31, n. 2, p. 261-272, 1994.

FERREIRA, Ana Paula Viana. Panorama atual do monitoramento da qualidade das águas e do uso de índices no Brasil. Estudo de caso: Ribeirão da Mata – Aplicação do IQA-CCME. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia e Ciências – CTC, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://www.bdtd.uerj.br:8443/handle/1/18101>. Acesso em: 02 fev. 2023.

FONTENELLE, A. S.; FIGUEIREDO, N. N.; VIEIRA V. V. P. Dam Safety Program in Ceara State in Brazil. In: Anais do International Congress On Conservation And Rehabilitation On Dams. Madrid, Espanha, 2002.

FRANCO, B. D. M. Microbiologia dos Alimentos. São Paulo: Atheneu, 2003.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S. A. Disponível em: <https://www.furnas.com.br/mapa/?culture=pt>. Acesso em: 17 nov. 2022.

GIL, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 4ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GRUPO BANCO MUNDIAL. Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento/Banco Mundial. Guia para a Elaboração de Projetos de Barragens, 2012.

GUIMARÃES, Artemizia Pessoa. Determinação de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HPAs) em alimentos obtidos por técnicas diferentes. 2014. 88 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/53066>. Acesso em: 16 mar. 2023.

HALL, E. M. Managing Risk: Methods for Software Systems Development. In: SEI Series in Software Engineering, Reading, MA: Addison Wesley Longman Inc. p.88-103, 1998.

HARTFORD, D. N. D. Emerging principles and practices in dam risk management. In: Proceedings of the International Workshop on Risk Analysis in Dam Safety Assessment. Taipei, Taiwan, Risk Analysis in dam safety assessment. Taiwan: Water Resources Publications, LLC, p. 1-34., 1999.

HARTFORD, D. N. D.; Baecher G.B. Risk and uncertainty in dam safety. London: Thomas Telford Publishing, 1994, 391 p.

HEALTH & SAFETY EXECUTIVE - HSE. A guide to measuring health & safety performance. Suffolk: HSE Books. Health and safety series booklet, 2001.

HORTON, R. K. An Index Number System for Rating Water Quality. Journal of Water Pollution Control Federation, [S. l.], 1965.

HUGHES, A.; HEWLETT, H.; SAMUELS, P.G.; MORRIS, M.; SAYERS, P.; MOFFAT, I.; HARDING, A.; TEDD, P. Risk Management for U.K. Reservoirs. London: CIRIA, 2000, 213 p.

INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEA. Indicators of Disaster Risk and Risk Management. Main Technical Report, IADB/IDEA. Program of Indicators for Disaster Risk Management, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2005.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION (ISO IEC 31010). Risk management: Risk assessment techniques. Edition 2.0, 2019-06.

IPCC. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2012, 582 p.

JUSBRASIL. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/topicos/10645479/inciso-iv-do-paragrafo-1-do-artigo-225-da-constituicao-federal-de-1988?ref=serp-featured>. Acesso em: 20 out. 2022.

KALIKI, Marco Antônio Gonçalves da Silva. Qualidade da água na lagoa de Jacarepaguá - Rio de Janeiro - RJ: aquisição de informações através do uso de técnicas de sensoriamento remoto. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia e Ciências – CTC, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: [http://www.profagua.uerj.br/lista\\_dissertacao.htm](http://www.profagua.uerj.br/lista_dissertacao.htm). Acesso em: 02 fev. 2023.

KAUFFMAN, Marcelo. Qualidade da água no reservatório de lajes: Ocorrências de Cianobactérias e Cianotoxinas. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia e Ciências – CTC, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: [http://www.profagua.uerj.br/lista\\_dissertacao.htm](http://www.profagua.uerj.br/lista_dissertacao.htm). Acesso em: 02 fev. 2023.

KREUZER, Harald. The use of risk analysis to support dam safety decisions and management. In: ICOLD CONGRESS, 20, Beijing, 2000. 28, 31.

KUPERMAN, S. C.; RE, G.; FERREIRA, W. V. F; TUNG, W. S.; VASCONSELOS, S. E.; ZÚNIGA, J. E. V.; RABELLO, M. Análise de risco e metodologia de tomada de decisões para barragens: evolução do sistema empregado pela Sabesp. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens (SNGB), Fortaleza, CE. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens – Anais, Rio de Janeiro: CBDB – Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, v. 02. p. 535-548, 2001.

LAFITTE, R. Classes of risk for dams. *Hydropower and Dams*, International Journal on Hydropower and Dams. 3 (6), 1996.

LATHAM, M. Constructing the Team. Final Report of the Government/Industry Review of Procurement and Contractual Arrangements in the Construction Industry. HMSO, London, 1994.

LIMA, Sheila Carolina de Miranda. Avaliação histórica da qualidade da bacia representativa do rio Piabanha através de Índices de Qualidade da Água. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia e Ciências – CTC, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.bdtd.uerj.br:8443/handle/1/18831>. Acesso em: 02 fev. 2023.

LYU, Zongjie; CHAI, Junrui; XU, Zengguang; QIN, Yuan; CAO, Jing. A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dams Failures based on Case History. *Advances in Civil Engineering*. Volume 2019. Article ID 4159306., 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2019/4159306>. Acesso em: 20 out. 2022.

MENESCAL, R. de A.; VIEIRA, V. de P. P. B.; OLIVEIRA; S. K. F. de. Terminologia para a análise de risco e segurança de barragens. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens (SNGB), 24. Fortaleza, CE. A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos no Brasil. Brasília: Ministério da Integração Nacional, jan. 2005, 2 ed., p. 31-53, 2001.

MEZINE, Wesley Andersen. Metodologia para monitoramento do assoreamento de reservatórios: proposta para a UHE Mauá. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. 126 p. Disponível em: [fainbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/1884/38855/2/R%20-%20D%20-%20WESLEY%20ANDERSEN%20MEZINE.pdf](https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/1884/38855/2/R%20-%20D%20-%20WESLEY%20ANDERSEN%20MEZINE.pdf). Acesso em: 25 out. 2022.

MINISTÉRIO PÚBLICO - CONTROLADORIA GERAL DA UNIÃO (MP / CGU). Instrução Normativa Conjunta 01/2016. Disponível em: <chrome-extension://efainbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.auditoriainterna.ufscar.br/arquivos/instrucao-normativa-nro-1-10-de-maio-de-2016-riscos.pdf>. Acesso em: 08 out. 2022.

MOROMISATO, German David Yagi. Programação dinâmica aplicada ao cálculo da energia firme de usinas hidrelétricas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012. Disponível em: <efainbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.ufjf.br/jspui/bitstream/ufjf/1931/1/germandavidyagimoromisato.pdf>. Acesso em: 20 set. 2022.

MORRIS, M.; SAMUELS, P.; ELLIOTT, C. Risk and Reservoirs in the UK. In: CADAM Meeting, nov. 1999, Zaragoza, Spain, 10p., 1999, p. 441-450.

MOURA, Mauro Gomes de. Manual técnico do licenciamento ambiental com EIA-RIMA. Porto Alegre: FEPAM, 2006. Coleção Referências, v.2, 65p.

MUNDO EDUCAÇÃO. Oxigênio dissolvido da água. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/oxigenio-dissolvido-agua.htm>. Acesso em: 23 fev. 2023.

NEMEROW, Nelson Leonard; SUMITOMO, Hisashi. Benefits of water quality enhancement: Water pollution control research series. New York (USA): EPA - Environmental Protection Agency, 1971.

OUR WORLD IN DATA. 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/natural-disasters-by-type>. Acesso em 19 out. 2022.

PASTRO, Milena Scaramussa; CECÍLIO, Roberto Avelino; ZANETTI, Sidney Sara; OLVEIRA, Francielle Rodrigues de; FERRAZ, Fabrina Teixeira. Estatística multivariada aplicada à análise de qualidade da água em diferentes ambientes de microbacias hidrográficas. *Nativa*, Sinop, v. 8, n. 2, p. 185-191, mar./abr. 2020. *Pesquisas Agrárias e Ambientais*. Disponível em: <http://www.ufmt.br/nativa>. Acesso em: 22 fev. 2023.

PEREIRA, Geraldo Magela. Projeto de Usinas Hidrelétricas: Passo a Passo. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

PEREIRA, Geraldo Magela. Projeto de Vertedouro: Passo a Passo. Rio de Janeiro: Planeta Azul Editora, 2017.



PEREIRA, Geraldo Magela. Acidentes e Rupturas de Barragens de Armazenamento de Água. São Paulo: ABGE, 2020.

PERINI, Daniel Sosti. Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/4363>. Acesso em: 10 nov. 2022.

PERKINELMER. Environmental Analysis Guide: Science makes a world of difference. Environmental testing solutions (2021). Disponível em: <https://www.perkinelmer.com>. Acesso em: 22 fev. 2023.

PINTO, A. V. Gestão de riscos e segurança de barragens. In: 3º Simpósio de Segurança de Barragens e Riscos Associados, 2008, Salvador, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, 2008.

PORTAL TRATAMENTO DE ÁGUA. Determinação da demanda bioquímica de oxigênio. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/determinacao-da-demanda-bioquimica-de-oxigenio-dbo/>. Acesso em: 22 fev. 2023.

PORTELA, Joelma Ferreira. Avaliação de espécies químicas potencialmente tóxicas na área de proteção ambiental da bacia do rio Descoberto. Tese (Doutorado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química – Instituto de Química, Universidade de Brasília, Brasília, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/38997>. Acesso em: 26 nov. 2022.

PORTO, Rubem La Latina. Fundamentos para gestão da água. São Paulo: Universidade de São Paulo, p. 232, 2012.

PRATI, L.; PAVANELLO, R.; PESARIN, F. Assessment of surface water quality by a single index of pollution. Water Research, [S. l.], v. 5, n. 9, p. 741–751, 1971. DOI: 10.1016/0043-1354(71)90097-2. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0043135471900972>. Acesso em: 22 fev.2023.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE - PMI. A Guide to the Project Management Body of Knowledge - PMBOK, 2021.

RAMOS, Flávia Cristina Canêdo. Gestão de riscos aplicada às políticas públicas: Sistematização teórica e prática das contribuições dos estudos de implementação. Dissertação (Mestrado em Governança e Desenvolvimento) - Escola Nacional de Administração Pública. Brasília, 2020. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/handle/1/5205>. Acesso em: 2022-11-25.

REBELO, Anabela R. Sequeira. Avaliação de risco para os recursos hídricos em caso de rejeição de substâncias perigosas. Dissertação (Mestrado em Química Industrial), Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2009. Disponível em: <https://ubibliorum.ubi.pt>. Acesso em: 11 out. 2022.

RETTEMEIER, Katja; NILKENS, Barbara; FALKENHAGEN, B.; KÖNGETER, Jürgen.

New developments in dam safety: Feasibility evaluation on risk assessment. In: Dams in a european context : proceedings of the ICOLD European symposium, 25 to 27 June 2001, Geiranger, Norway, 2001.

ROBERTSON, A., MAC, G.; SHAW, S. Risk Management for Major Geotechnical Structures on Mines. In: proceedings of Computer Applications in the Mineral Industries, Calgary, Alberta, Canada, 8-10 September 2003. Disponível em: <https://www.rgc.ca/>. Acesso em: 20 mai. 2015.

ROCHA, Júlia Campos. Abordagem sistêmica na gestão dos recursos hídricos de reservatórios hidrelétricos: Aplicação no reservatório da UHE de Funil-RJ. Dissertação (Mestrado em Planejamento Estratégico) - UFRJ / COPPE / Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/index.php/pt/publicacoes/dissertacoes/2021/2147-avaliacao-da-efetividade-da-fase-de-pos-licenciamento-do-brasil-2>. Acesso em: 11 out. 2022.

SAKIS, Gisele da Silva; SOUZA FILHO, Elton Alves de; SOUZA, David Robert Santos de; QUEIROZ NETO, João Carlos de; LIMA, Giselle Leão; BATISTA, Ieda Hortêncio. Caracterização físico-química das águas em áreas sob influência antrópica e preservadas no rio puraquequara, em Manaus. 9ª reunião de estudos ambientais. Cristiano Poletto; Felipe Fernandes; Patrícia Diniz Martins (Organizadores). ANAIS da 9ª Reunião de Estudos Ambientais - Vol. 1 / Cristiano Poletto; Felipe Fernandes; Patrícia Diniz Martins (Organizadores) – Gramado, RS: Editora GFM, 2019.

SANTOS, R. N. C. dos. Enquadramento das análises de risco em geotecnia. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL), 257 p., 2006. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Enquadramento-das-An%C3%A1lises-de-Riscos-em-Geotecnia-Santos/938fd582a94c653d4ca5916fc1a5499de0fa5e50>. Acesso em: 22 out. 2022.

SANTOS, R. N. C. dos; CALDEIRA, L. M. M. S.; SERRA, J. P. B. FMEA of a tailings dam. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, DOI:10.1080/17499518.2011.615751, 2011.

SANTOS, M. A.; SILVA, D. S. Risco e Gestão de Crises em Vales a Jusante de Barragens. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal: LNEC/IST, 1998, 151 p.

SILVA, Evandro Barbosa da. Teores de elementos potencialmente tóxicos em solos de uma bacia hidrográfica e avaliação de risco à saúde humana. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2013. Disponível em: [efaidnbmnnnibpcajpcgltclefindmkaj/https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-26072013-112631/publico/Evandro\\_Barbosa\\_da\\_Silva.pdf](efaidnbmnnnibpcajpcgltclefindmkaj/https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-26072013-112631/publico/Evandro_Barbosa_da_Silva.pdf). Acesso em: 16 mar. 2023.

SILVA, Hernane Teixeira da. Avaliação da evolução da qualidade da água superficial na bacia do Rio Pomba, MG, utilizando o índice IQA-CCME. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia e Ciências – CTC, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.bdt.d.uerj.br:8443/handle/1/18831>. Acesso em: 02 fev. 2023.

SILVEIRA, Livia Garcia. Estudo comparativo da utilização do IQA-NSF e IQA-CCME para análise da qualidade da água no estado do Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia e Ciências – CTC, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://www.bdt.d.uerj.br:8443/handle/1/13508>. Acesso em: 02 fev. 2023.

SILVEIRA, Denise Tolfo; CÓRDOVA, Fernanda Peixoto. Métodos de pesquisa. [organizado por] Tatiana Engel Gerhardt e Denise Tolfo Silveira; coordenado pela Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. 120 p.

SILVEIRA, J. F. A.; MACHADO, J. A. de A. Construção das Árvores de Evento e Análise de Riscos da Barragem João Leite da SANEAGO. Comitê Brasileiro de Barragens, XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens, Goiânia – GO, T.95.A02, 2005.

SOUZA, Wesley Robert. Análise de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos em sedimentos do ribeirão do funil na região de Ouro Preto-MG. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3081>. Acesso em: 21 out. 2022.

SPERLING, M. V. Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3 ed. Belo Horizonte: DESA; UFMG, 2005. 452 p. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuais, v.1.

TRANNIN, Isabel Cristina de Barros; SILVA, Marcos Henrique da; CATELANI, Celso de Souza; BRANCO, Alessandra M. Mattos; ROMAN, Vanessa Villalta Lima; SIMÕES, Sílvio Jorge Coelho. Influência do uso e ocupação do solo na qualidade da água da bacia hidrográfica da serra da Mantiqueira. XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Florianópolis-SC: 28 jul a 02 ago, 2013.

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO - TCU. Referencial básico de governança. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://portal.tcu.gov.br/data/files/FA/B6/EA/85/1CD4671023455957E18818A8/Referencial\\_basico\\_governanca\\_2\\_edicao.PDF](chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://portal.tcu.gov.br/data/files/FA/B6/EA/85/1CD4671023455957E18818A8/Referencial_basico_governanca_2_edicao.PDF). V. 2. Brasília, 2014. Acesso em: 08 out. 2022.

TUNDISI, José Galizia. Recursos hídricos no Brasil: problemas, desafios e estratégias para o futuro. José Galizia Tundisi (coordenador). Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2014.

UMBUZEIRO, G.; LORENZETTI, M. Fundamentos da gestão da qualidade das águas superficiais: resolução CONAMA 357/2005. Limeira: Unicamp, 2009.

UNISDR. Living with Risk: A global review of disaster reduction initiatives. V. 1, New York and Geneva: United Nations, 2004. Disponível em: <https://www.undrr.org/publication/living-risk-global-review-disaster-reduction-initiatives>. Acesso em: 13 dez. 2022.

UNITED KINGDOM. Statutory Instrument 1999, n.º 743 – The Control of Major Accident Hazards Regulations, 1999-03-17, 1999. Disponível em: <https://www.legislation.gov.uk/ukxi/1999/743/contents/made>. Acesso em: 13 dez. 2022.

UNITED KINGDOM. Statutory Instrument 2005, n.º 1088 – The Control of Major Accident Hazards Regulations (Amendment), 2005-04-07, 2005. Disponível em: <https://www.legislation.gov.uk/ukxi/2005/1088/contents/made>. Acesso em: 13 dez. 2022.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Hydrologic Engineering Requirements for Reservoir. 1997. Disponível em: [efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Users/182/86/2486/EM\\_1110-2-1420.pdf](efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Users/182/86/2486/EM_1110-2-1420.pdf). Acesso em: 17 dez. 2022.

U.S. BUREAU OF RECLAMATION – USBR. Guidelines to Decision Analysis. ACER Technical Memorandum nº 7, USBR, Denver, Colorado, 1986. Disponível em: <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/manuals.html>. Acesso em: 17 nov. 2022.

US DEPARTMENT OF DEFENSE (2005). MIL-STD-1629 Revision, a procedures for performing FMECA. MIL Standards. Disponível em: <http://store.milstandards.com/index.asp?PageAction=VIEWPROD&ProdID=63>. Acesso em: 20 mai. 2015.

VON SPERLING. M. Princípios do tratamento biológico de águas residuais. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. DESA-UFMG. V.1, 1996, 240p.

WELLE, T.; BIRKMANN, J.; RHYNER, J.; WITTING, M.; WOLFERTZ, J. (2012) World Risk Index 2012. Concept, updating and results, World Risk Report 2012, pp.11–27, HRSG, Bündnis Entwicklung Hilft, Aachen, Germany.

WELLE, T.; BIRKMANN, J.; KRAUSE, D.; SUAREZ, D.C.; SETIADI, N.; WOLFERTZ, J. The World Risk Index: a concept for the assessment of risk and vulnerability at global/national scales, in Birkmann, J. (Ed.): Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies, 2. ed., pp.219–251, United Nations University, New York, 2013.

WISNER, B.; BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIES, I. At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters. London, New York: Routledge, 2004.

ZUCKER, E. Standard evaluation procedure acute toxicity test for freshwater fish. Washington: USEPA, 1985,17p.

## APÊNDICE – Planilha automatizada para cálculo da MARR e IMARR

### Planilha MARR (continua)

<b>METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE RISCOS EM RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS (AUTOR: FLAVIO SOHLER)</b>			
OBS: PREENCHER SOMENTE OS CAMPOS EM "AZUL" QUE SÃO PARA A ENTRADA DE DADOS	OBS: CAMPOS EM "VERDE" SÃO CALCULADOS AUTOMATICAMENTE PELA PLANILHA (NÃO ALTERAR)	OBS: CAMPOS EM AMARELO SÃO AS RESPOSTAS DA PLANILHA QUANTO À ACEITABILIDADE OU NÃO DAS VARIÁVEIS (NÃO ALTERAR)	
<b>OBS: PARA OS PARÂMETROS NÃO AVALIADOS NOS ENSAIOS, BASTA NÃO SELECIONAR NENHUMA OPÇÃO (DEIXAR EM BRANCO)</b>			
	CLASSE	VALOR	PESO FINAL
<b>1. ALTURA DO NÍVEL DA ÁGUA (ANA):</b> >0,5m acima do nível normal do rio	3-Atuação Imediata	3	3
		VERIFICAR O PARÂMETRO INACEITÁVEL	0,05
<b>2. VELOCIDADE DO RIO (VER):</b> VER > 2,0 m/s	3-Atuação Imediata	3	3
		VERIFICAR O PARÂMETRO INACEITÁVEL	0,04
<b>3. ASSOREAMENTO (ASS):</b>			
<b>3.1 PERDA DO SOLO (PSS):</b> Pss > 100 t/km2.ano	3-Alto potencial a produção de sedimentos	3	3
		VERIFICAR O PARÂMETRO INACEITÁVEL	
<b>3.2 POSIÇÃO RELATIVA NA CASCATA (PRC):</b> Reservatório de cabeceira	3-Alta susceptibilidade	3	3
		VERIFICAR O PARÂMETRO INACEITÁVEL	
<b>3.3 REGIME DE OPERAÇÃO DO RESERVATÓRIO (ROR):</b> Reservatórios de regularização perdem capacidade devido ao assoreamento	3-Alta criticidade	3	3
		VERIFICAR O PARÂMETRO INACEITÁVEL	
<b>3.4 MAGNITUDE E IMPORTÂNCIA DOS EFEITOS DO ASSOREAMENTO (MI):</b> Reservatório possui alta susceptibilidade ao assoreamento ao menos em um do Reservatório possui alta susceptibilidade ao assoreamento ao menos em um dos parâmetros anteriores, possui hidrovias ou no mínimo 3	3-Alta externalidade	3	3
		VERIFICAR O PARÂMETRO INACEITÁVEL	
<b>NÍVEL DE CRITICIDADE PARA RESERVATÓRIOS:</b> NC = (Pss + Prc + MI + (4 x Ror)) / 21	1,00	Reservatório que apresenta risco de assoreamento e os efeitos são prejudiciais a geração de energia elétrica	0,05
<b>NÍVEL DE CRITICIDADE PARA RIOS:</b> NC = (Pss + MI) / 6	1,00	Rio que apresenta risco de assoreamento e os efeitos podem ter impactos ambientais, sociais e econômicos	0,05
<b>4. ESTABILIDADE DE TALUDES (EST):</b> Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão com potencial de comprometimento de riscos no rio	3-Atuação Imediata	3	3
		VERIFICAR O PARÂMETRO INACEITÁVEL	0,05
<b>5. NÍVEL DE TOXICIDADE EM ORGANISMOS AQUÁTICOS (NTO):</b> NTO < 0,1 mg/l	5-Extremamente Tóxico	5	5
		VERIFICAR O PARÂMETRO INACEITÁVEL	0,06
<b>6. TURBIDEZ DA ÁGUA (TUA):</b> TUA > 100 UTN (Turbidez alta, presença de material particulado em suspensão)	3-Atuação Imediata	3	3
		VERIFICAR O PARÂMETRO INACEITÁVEL	0,05
<b>7. NÍVEL DE pH (NPH):</b> NPH < 6 (se houver despejo de ácidos, os peixes precisarão respirar frequenten	3-Ácida	3	3
		VERIFICAR O PARÂMETRO INACEITÁVEL	0,05
<b>8. COR DA ÁGUA (COA):</b> COA > 75 mg Pt/L	2-Inaceitável	2	2
		VERIFICAR O PARÂMETRO INACEITÁVEL	0,04
<b>QUAL A CLASSE DO RIO (I, II ou III) ?</b>	I		
<b>9. PRESENÇA DE CONTAMINANTES ORGÂNICOS E INORGÂNICOS (PCO):</b> PARÂMETROS ORGÂNICOS - PCO (9.1 a 9.6)			
<b>9.1 CLOROFILA a - Cl (RIO CLASSE I e II - mg/L):</b> Cl ≤ 0,010 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>9.1 CLOROFILA a - Cl (RIO CLASSE III):</b>			0
<b>9.2 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA - CE (RIO CLASSE I, II, III):</b> CE ≤ 0,1 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>9.3 SÍLICA - Si (RIO CLASSE I, II, III):</b> Si ≤ 0,025 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>9.4 CLORETO - Ct (RIO CLASSE I e II):</b> Ct ≤ 250 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>9.4 CLORETO - Ct (RIO CLASSE III):</b>			0
<b>9.5 SÓDIO - So (RIO CLASSE I e II):</b> So ≤ 200 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>9.5 SÓDIO - So (RIO CLASSE III):</b>			0
<b>9.6 HPA Fluoranteno, Benzo(b) fluoranteno, Benzo(k)fluoranteno, Indeno(1,2,3-cd)pireno Benzo(a)pireno, Benzo(g,h,i)perileno (RIO CLASSE I, II, III):</b> HPA ≤ 1000 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>PRESENÇA DE CONTAMINANTES ORGÂNICOS - PCO (RIO CLASSE I, II ou III):</b>	I	1,00	

Fonte: O Autor, 2023.

## Planilha MARR (continua)

PARÂMETROS INORGÂNICOS - PCI (9.7 a 9.26)			
<b>9.7 ALUMÍNIO - Al (RIO CLASSE I, II):</b>			
Al ≤ 0,1 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>9.7 ALUMÍNIO - Al (RIO CLASSE III):</b>			0
<b>9.8 ARSÊNIO - As (RIO CLASSE I, II)</b>			
As ≤ 0,01 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>9.8 ARSÊNIO - As (RIO CLASSE III)</b>			0
<b>9.9 BÁRIO - Ba (RIO CLASSE I, II)</b>			
Ba ≤ 0,7 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>9.9 BÁRIO - Ba (RIO CLASSE III)</b>			0
<b>9.10 BERÍLIO - Be (RIO CLASSE I, II)</b>			
Be ≤ 0,04 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>9.10 BERÍLIO - Be (RIO CLASSE III)</b>			0
<b>9.11 Cádmio - Cd (RIO CLASSE I, II)</b>			
Cd ≤ 0,001 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>9.11 Cádmio - Cd (RIO CLASSE III)</b>			0
<b>9.12 Chumbo - Pb (RIO CLASSE I, II)</b>			
Pb ≤ 0,01 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>9.12 Chumbo - Pb (RIO CLASSE III)</b>			0
<b>9.13 Cobalto - Co (RIO CLASSE I, II)</b>			
Co ≤ 0,05 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>9.13 Cobalto - Co (RIO CLASSE III)</b>			0
<b>9.14 Cobre - Cu (RIO CLASSE I, II)</b>			
Cu ≤ 0,009 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>9.14 Cobre - Cu (RIO CLASSE III)</b>			0
<b>9.15 Cromo - Cr (RIO CLASSE I, II, III)</b>			
Cr ≤ 0,05 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>9.16 Ferro - Fe (RIO CLASSE I, II)</b>			
Fe ≤ 0,3 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>9.16 Ferro - Fe (RIO CLASSE III)</b>			0
<b>9.17 Fósforo - P (RIO CLASSE I, II)</b>			
P ≤ 0,1 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>9.17 Fósforo - P (RIO CLASSE III)</b>			0
<b>9.18 Lítio - Li (RIO CLASSE I, II, III)</b>			
Li ≤ 2,5 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>9.19 Manganês - Mn (RIO CLASSE I, II)</b>			
Mn ≤ 0,1 mg/L	1-Aceitável	1	1
<b>9.19 Manganês - Mn (RIO CLASSE III)</b>			0
<b>9.20 Mercúrio - Hg (RIO CLASSE I, II)</b>			
Hg ≤ 0,0002 mg/L	1-Aceitável	1	1

Fonte: O Autor, 2023.

## Planilha MARR (continua)

9.20 Mercúrio - Hg (RIO CLASSE III)				0
9.21 Níquel - Ni (RIO CLASSE I, II, III) Ni ≤ 0,025 mg/L	1-Aceitável	1		1
9.22 Nitrogênio - N (RIO CLASSE I, II) - Para pH ≤ 7,5 N ≤ 3,7 mg/L	1-Aceitável	1		1
9.22 Nitrogênio - N (RIO CLASSE III) - Para pH ≤ 7,5				0
9.22 Nitrogênio - N (RIO CLASSE I, II) - 7,5 < pH ≤ 8,0				0
9.22 Nitrogênio - N (RIO CLASSE III) - 7,5 < pH ≤ 8,0				0
9.22 Nitrogênio - N (RIO CLASSE I, II) - 8,0 < pH ≤ 8,5				0
9.22 Nitrogênio - N (RIO CLASSE III) - 8,0 < pH ≤ 8,5				0
9.22 Nitrogênio - N (RIO CLASSE I, II) - pH > 8,5				0
9.22 Nitrogênio - N (RIO CLASSE III) - pH > 8,5				0
9.23 Prata - Ag (RIO CLASSE I, II) Ag ≤ 0,01 mg/L	1-Aceitável	1		1
9.23 Prata - Ag (RIO CLASSE III)				0
9.24 Selênio - Se (RIO CLASSE I, II) Se ≤ 0,01 mg/L	1-Aceitável	1		1
9.24 Selênio - Se (RIO CLASSE III)				0
9.25 Sulfato - SO4 (RIO CLASSE I, II, III) SO4 ≤ 250 mg/L	1-Aceitável	1		1
9.26 Zinco - Zn (RIO CLASSE I, II) Zn ≤ 0,18 mg/L	1-Aceitável	1		1
9.26 Zinco - Zn (RIO CLASSE III)				0
PRESEÇA DE CONTAMINANTES INORGÂNICOS - PCI (RIO CLASSE I, II ou III):	I	1,00		
9. PRESEÇA DE CONTAMINANTES ORGÂNICOS E INORGÂNICOS (PCOI) AVALIAÇÃO FINAL - SE UM DOS PARÂMETROS É INACEITÁVEL, ENTÃO, PCOI = 2 (INACEITÁVEL):	1-Aceitável	1,00		0,06
10. Nível de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO): Rio Classe III - DBO > 10 mg/L	2-Inaceitável	2	2	0,06
11. Nível de Oxigênio Dissolvido (NOD): NOD < 4 mg/L O2	2-Inaceitável	2	2	0,06
12. Coliformes Fecais (COF): COF > 200 coliformes termotolerantes / 100 mililitros	2-Inaceitável	2	2	0,05
13. Temperatura (TEM): TEM < 10°C ou TEM > 35°C	2-Inaceitável	2	2	0,04
14. Sólidos Dissolvidos Totais (SDT): SDT > 500 mg/L	2-Inaceitável	2	2	0,04
15. Existência ou não de Barragem de Regularização (EBR): Não existe barragem no leito do rio	2-Não existe	2	2	0,04
16. Existência ou não de Sistema de Aviso e Alerta (SAA): Não existe sistema de aviso e alerta	2-Não existe	2	2	0,04

Fonte: O autor, 2023.



## Planilha MARR (conclusão)

<b>17. Existência ou não de Tratamento de Esgoto (ETE):</b>				
Não existe tratamento de esgoto	2-Não existe	2	2	0,07
<b>18. Impacto Econômico a Jusante (IEJ):</b>				
Danificadas mais de 50 casas ou despesas > R\$10 milhões	4-Alto	4	4	0,05
<b>19. Impacto Social a Jusante (ISJ):</b>				
Pessoas afetadas > 1000 ou perda de capacidade produtiva > 30%	4-Alto	4	4	0,05
<b>20. Impacto Ambiental a Jusante (IAJ):</b>				
Área afetada ≤ a 0,1km <sup>2</sup> ; duração do impacto ≤ 1 mês; nenhum efeito ecológico	1-Baixo	1	1	0,05
<b>ÍNDICE DA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE RISCOS PARA RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS (IMARRHS)</b>				
<b>Reservatório ou Rio ?</b>				
Rio	20,77			
<b>CLASSE DO RECURSO HÍDRICO:</b>				
<b>IMPRÓPRIA - AS CONDIÇÕES ESTÃO AMEAÇADAS OU PREJUDICADAS AFASTANDO-SE DOS NÍVEIS NATURAIS OU DESEJÁVEIS</b>				

Fonte: O autor, 2023.

## Planilha Padrão (continua)

<b>1. ANA: CLASSE</b>	<b>VALOR-CLASSE</b>	<b>FAIXAS</b>
CONTROLADO		1 ≤0,3m acima do nível normal do rio
ALERTA		2 0,3m < ANA ≤ 0,5m acima do nível normal do rio
ATUAÇÃO IMEDIATA		3 >0,5m acima do nível normal do rio
<b>2. VER: CLASSE</b>	<b>VALOR-CLASSE</b>	
CONTROLADO		1 VER ≤ 1,0 m/s
ALERTA		2 1,0 m/s < VER ≤ 2,0 m/s
ATUAÇÃO IMEDIATA		3 VER > 2,0 m/s
<b>3. ASSOREAMENTO:</b>		
<b>3.1 PERDA DO SOLO (PSS):</b>	<b>VALOR-CLASSE</b>	
1-Baixo potencial a produção de sedimentos		1 Pss < 25 t/km <sup>2</sup> .ano
2-Médio potencial a produção de sedimentos		2 25 t/km <sup>2</sup> .ano ≤ Pss ≤ 100 t/km <sup>2</sup> .ano
3-Alto potencial a produção de sedimentos		3 Pss > 100 t/km <sup>2</sup> .ano
<b>3.2 POSIÇÃO RELATIVA NA CASCATA (PRC):</b>	<b>VALOR-CLASSE</b>	
1-Baixa susceptibilidade		1 Reservatório de jusante tem uma pequena bacia incremental
2-Média susceptibilidade		2 Reservatório de jusante tem uma grande bacia incremental
3-Alta susceptibilidade		3 Reservatório de cabeceira
<b>3.3 REGIME DE OPERAÇÃO DO RESERVATÓRIO (ROR):</b>	<b>VALOR-CLASSE</b>	
1-Baixa criticidade		1 Demais casos que não se enquadram nas outras duas classes
2-Média criticidade		2 Reservatórios a fio d'água apresentam problemas com o assoreamento na elevação dos níveis da água do remanso a montante
3-Alta criticidade		3 Reservatórios de regularização perdem capacidade devido ao assoreamento
<b>3.4 MAGNITUDE E IMPORTÂNCIA DOS EFEITOS DO ASSOREAMENTO (MI):</b>	<b>VALOR-CLASSE</b>	
1-Baixa externalidade		1 Demais situações Reservatório possui ao menos uma classificação como média susceptibilidade ou no mínimo 2 municípios com mais de 50 mil habitantes localizados na margem do rio principal
2-Média externalidade		2 Reservatório possui alta susceptibilidade ao assoreamento ao menos em um dos parâmetros anteriores, possui hidrovias ou no mínimo 3 municípios com mais de 50 mil habitantes na margem
3-Alta externalidade		3 municípios com mais de 50 mil habitantes na margem
<b>4. ESTABILIDADE DE TALUDES (EST):</b>	<b>VALOR-CLASSE</b>	
1-Controlado		1 Inexistente ou algumas falhas na proteção de taludes
2-Alerta		2 Erosões superficiais, raízes expostas de árvores, falta de vegetação, necessitando ação corretiva
3-Atuação Imediata		3 Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão com potencial de comprometimento de riscos no rio
<b>5. NÍVEL DE TOXICIDADE EM ORGANISMOS AQUÁTICOS (NTO):</b>	<b>VALOR-CLASSE</b>	
1-Praticamente Não-Tóxico		1 NTO ≥ 100 mg/l
2-Ligeiramente Tóxico		2 10 ≤ NTO < 100 mg/l
3-Medianamente Tóxico		3 1 ≤ NTO < 10 mg/l
4-Altamente Tóxico		4 0,1 ≤ NTO < 1,0 mg/l
5-Extremamente Tóxico		5 NTO < 0,1 mg/l
<b>6. TURBIDEZ DA ÁGUA (TUA):</b>	<b>VALOR-CLASSE</b>	
1-Controlado		1 TUA < 40 UTN (Rios classe 1)
2-Satisfatório		2 40 ≤ TUA ≤ 100 UTN (Rios classe 2 e 3)
3-Atuação Imediata		3 TUA > 100 UTN (Turbidez alta, presença de material particulado em suspensão)
<b>7. NÍVEL DE pH (NPH):</b>	<b>VALOR-CLASSE</b>	
1-Aceitável		1 6 ≤ NPH ≤ 9
2-Alcalina		2 NPH ≥ 9 (Se houve despejo de soda, há formação de óxido de cálcio que provoca corrosão do epitélio branquial e das nadadeiras, levando os peixes à morte)
3-Ácida		3 NPH < 6 (se houver despejo de ácidos, os peixes precisarão respirar frequentemente na superfície e se cair muito o pH, os peixes têm morte imediata)
<b>8. COR DA ÁGUA (COA):</b>	<b>VALOR-CLASSE</b>	
1-Aceitável		1 COA ≤ 75,0 mg Pt/L
2-Inaceitável		2 COA > 75 mg Pt/L

Fonte: O autor, 2023.

## Planilha Padrão (continua)

9. PRESENÇA DE CONTAMINANTES ORGÂNICOS E INORGÂNICOS (PCOI):		
PARÂMETROS ORGÂNICOS:		
9.1 CLOROFILA a - Cl (RIO CLASSE I e II):	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Cl ≤ 0,010 mg/L
2-Inaceitável		2 Cl > 0,010 mg/L
9.1 CLOROFILA a - Cl (RIO CLASSE III):		
1-Aceitável		1 Cl ≤ 0,060 mg/L
2-Inaceitável		2 Cl > 0,060 mg/L
9.2 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA - CE (RIO CLASSE I, II, III):	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 CE ≤ 0,1 mg/L
2-Inaceitável		2 CE > 0,1 mg/L
9.3 SÍLICA - Si (RIO CLASSE I, II, III):	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Si ≤ 0,025 mg/L
2-Inaceitável		2 Si > 0,025 mg/L
9.4 CLORETO - Ct (RIO CLASSE I e II):	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Ct ≤ 250 mg/L
2-Inaceitável		2 Ct > 250 mg/L
9.4 CLORETO - Ct (RIO CLASSE III):	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Ct ≤ 300 mg/L
2-Inaceitável		2 Ct > 300 mg/L
9.5 SÓDIO - So (RIO CLASSE I e II):	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 So ≤ 200 mg/L
2-Inaceitável		2 So > 200 mg/L
9.5 SÓDIO - So (RIO CLASSE III):	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 So ≤ 300 mg/L
2-Inaceitável		2 So > 300 mg/L
9.6 HPA Fluoranteno, Benzo(b) fluoranteno, Benzo(k)fluoranteno, Indeno(1,2,3-cd)pireno Benzo(a)pireno, Benzo(g,h,i)perileno (RIO CLASSE I, II, III):	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 HPA ≤ 1000 mg/L
2-Inaceitável		2 HPA > 1000 mg/L
PARÂMETROS INORGÂNICOS:		
9.7 ALUMÍNIO - Al (RIO CLASSE i, ii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Al ≤ 0,1 mg/L
2-Inaceitável		2 Al > 0,1 mg/L
9.7 ALUMÍNIO - Al (RIO CLASSE iii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Al ≤ 0,2 mg/L
2-Inaceitável		2 Al > 0,2 mg/L
9.8 ARSÊNIO - As (RIO CLASSE i, ii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 As ≤ 0,01 mg/L
2-Inaceitável		2 As > 0,01 mg/L
9.8 ARSÊNIO - As (RIO CLASSE iii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 As ≤ 0,033 mg/L
2-Inaceitável		2 As > 0,033 mg/L
9.9 BÁRIO - Ba (RIO CLASSE i, ii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Ba ≤ 0,7 mg/L
2-Inaceitável		2 Ba > 0,7 mg/L
9.9 BÁRIO - Ba (RIO CLASSE iii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Ba ≤ 1,0 mg/L
2-Inaceitável		2 Ba > 1,0 mg/L
9.10 BERÍLIO - Be (RIO CLASSE i, ii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Be ≤ 0,04 mg/L
2-Inaceitável		2 Be > 0,04 mg/L

Fonte: O autor, 2023.

## Planilha Padrão (continua)

9.10 BERÍLIO - Be (RIO CLASSE iii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Be ≤ 0,1 mg/L
2-Inaceitável		2 Be > 0,1 mg/L
9.11 CÁDMIO - Cd (RIO CLASSE i, ii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Cd ≤ 0,001 mg/L
2-Inaceitável		2 Cd > 0,001 mg/L
9.11 CÁDMIO - Cd (RIO CLASSE iii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Cd ≤ 0,01 mg/L
2-Inaceitável		2 Cd > 0,01 mg/L
9.12 CHUMBO - Pb (RIO CLASSE i, ii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Pb ≤ 0,01 mg/L
2-Inaceitável		2 Pb > 0,01 mg/L
9.12 CHUMBO - Pb (RIO CLASSE iii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Pb ≤ 0,033 mg/L
2-Inaceitável		2 Pb > 0,033 mg/L
9.13 COBALTO - Co (RIO CLASSE i, ii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Co ≤ 0,05 mg/L
2-Inaceitável		2 Co > 0,05 mg/L
9.13 COBALTO - Co (RIO CLASSE iii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Co ≤ 0,2 mg/L
2-Inaceitável		2 Co > 0,2 mg/L
9.14 COBRE - Cu (RIO CLASSE i, ii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Cu ≤ 0,009 mg/L
2-Inaceitável		2 Cu > 0,009 mg/L
9.14 COBRE - Cu (RIO CLASSE iii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Cu ≤ 0,013 mg/L
2-Inaceitável		2 Cu > 0,013 mg/L
9.15 CROMO - CR (RIO CLASSE i, ii, III)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Cr ≤ 0,05 mg/L
2-Inaceitável		2 Cr > 0,05 mg/L
9.16 FERRO - Fe (RIO CLASSE i, ii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Fe ≤ 0,3 mg/L
2-Inaceitável		2 Fe > 0,3 mg/L
9.16 FERRO - Fe (RIO CLASSE iii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Fe ≤ 5,0 mg/L
2-Inaceitável		2 Fe > 5,0 mg/L
9.17 FÓSFORO - P (RIO CLASSE i, ii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 P ≤ 0,1 mg/L
2-Inaceitável		2 P > 0,1 mg/L
9.17 FÓSFORO - P (RIO CLASSE iii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 P ≤ 0,05 mg/L
2-Inaceitável		2 P > 0,05 mg/L
9.18 LÍTIU - Li (RIO CLASSE i, ii, III)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Li ≤ 2,5 mg/L
2-Inaceitável		2 Li > 2,5 mg/L
9.19 MANGANÊS - Mn (RIO CLASSE i, ii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Mn ≤ 0,1 mg/L
2-Inaceitável		2 Mn > 0,1 mg/L
9.19 MANGANÊS - Mn (RIO CLASSE iii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Mn ≤ 0,5 mg/L
2-Inaceitável		2 Mn > 0,5 mg/L
9.20 MERCÚRIO - Hg (RIO CLASSE i, ii)	VALOR-CLASSE	
1-Aceitável		1 Hg ≤ 0,0002 mg/L
2-Inaceitável		2 Hg > 0,0002 mg/L

Fonte: O autor, 2023.

## Planilha Padrão (continua)

9.20 MERCÚRIO - Hg (RIO CLASSE iii)	VALOR-CLASSE		
1-Aceitável	1 Hg ≤ 0,002 mg/L		
2-Inaceitável	2 Hg > 0,002 mg/L		
9.21 NÍQUEL - Ni (RIO CLASSE i, ii, III)	VALOR-CLASSE		
1-Aceitável	1 Ni ≤ 0,025 mg/L		
2-Inaceitável	2 Ni > 0,025 mg/L		
9.22 NITROGÊNIO AMONIAICAL TOTAL - N (RIO CLASSE i, ii)	VALOR-CLASSE		
1-Aceitável	1 N ≤ 3,7 mg/L		Para pH ≤ 7,5
2-Inaceitável	2 N > 3,7 mg/L		
1-Aceitável	1 N ≤ 2,0 mg/L		Para 7,5 < pH ≤ 8,0
2-Inaceitável	2 N > 2,0 mg/L		
1-Aceitável	1 N ≤ 1,0 mg/L		Para 8,0 < pH ≤ 8,5
2-Inaceitável	2 N > 1,0 mg/L		
1-Aceitável	1 N ≤ 0,5 mg/L		Para pH > 8,5
2-Inaceitável	2 N > 0,5 mg/L		
9.22 NITROGÊNIO AMONIAICAL TOTAL - N (RIO CLASSE iii)	VALOR-CLASSE		
1-Aceitável	1 N ≤ 13,3 mg/L		Para pH ≤ 7,5
2-Inaceitável	2 N > 13,3 mg/L		
1-Aceitável	1 N ≤ 5,6 mg/L		Para 7,5 < pH ≤ 8,0
2-Inaceitável	2 N > 5,6 mg/L		
1-Aceitável	1 N ≤ 2,2 mg/L		Para 8,0 < pH ≤ 8,5
2-Inaceitável	2 N > 2,2 mg/L		
1-Aceitável	1 N ≤ 1,0 mg/L		Para pH > 8,5
2-Inaceitável	2 N > 1,0 mg/L		

9.23 PRATA - Ag (RIO CLASSE i, ii)	VALOR-CLASSE		
1-Aceitável	1 Ag ≤ 0,01 mg/L		
2-Inaceitável	2 Ag > 0,01 mg/L		
9.23 PRATA - Ag (RIO CLASSE iii)	VALOR-CLASSE		
1-Aceitável	1 Ag ≤ 0,05 mg/L		
2-Inaceitável	2 Ag > 0,05 mg/L		
9.24 SELÊNIO - Se (RIO CLASSE i, ii)	VALOR-CLASSE		
1-Aceitável	1 Se ≤ 0,01 mg/L		
2-Inaceitável	2 Se > 0,01 mg/L		
9.24 SELÊNIO - Se (RIO CLASSE iii)	VALOR-CLASSE		
1-Aceitável	1 Se ≤ 0,05 mg/L		
2-Inaceitável	2 Se > 0,05 mg/L		
9.25 SULFATO - SO <sub>4</sub> (RIO CLASSE i, ii, III)	VALOR-CLASSE		
1-Aceitável	1 SO <sub>4</sub> ≤ 250 mg/L		
2-Inaceitável	2 SO <sub>4</sub> > 250 mg/L		
9.26 ZINCO - Zn (RIO CLASSE i, ii)	VALOR-CLASSE		
1-Aceitável	1 Zn ≤ 0,18 mg/L		
2-Inaceitável	2 Zn > 0,18 mg/L		
9.26 ZINCO - Zn (RIO CLASSE iii)	VALOR-CLASSE		
1-Aceitável	1 Zn ≤ 5,0 mg/L		
2-Inaceitável	2 Zn > 5,0 mg/L		
CLASSE DO RIO (I, II ou III):	I		
	II		
	III		

Fonte: O autor, 2023.

## Planilha Padrão (conclusão)

10. Nível de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO):		VALOR-CLASSE			
1-Aceitável			1	Rio Classe I - DBO ≤ 3 mg/L	
2-Inaceitável			2	Rio Classe I - DBO > 3 mg/L	
1-Aceitável			1	Rio Classe II - DBO ≤ 5 mg/L	
2-Inaceitável			2	Rio Classe II - DBO > 5 mg/L	
1-Aceitável			1	Rio Classe III - DBO ≤ 10 mg/L	
2-Inaceitável			2	Rio Classe III - DBO > 10 mg/L	
11. Nível de Oxigênio Dissolvido (NOD):		VALOR-CLASSE			
1-Aceitável			1	Rio Classe I - NOD ≥ 6 mg/L O <sub>2</sub>	
1-Aceitável			2	Rio Classe II - NOD ≥ 5 mg/L O <sub>2</sub>	
1-Aceitável				Rio Classe III - NOD ≥ 4 mg/L O <sub>2</sub>	
2-Inaceitável				NOD < 4 mg/L O <sub>2</sub>	
12. Coliformes Fecais (COF):		VALOR-CLASSE			
1-Aceitável			1	COF ≤ 200 coliformes termotolerantes / 100 mililitros	
2-Inaceitável			2	COF > 200 coliformes termotolerantes / 100 mililitros	
13. Temperatura (TEM):		VALOR-CLASSE			
1-Aceitável			1	10°C ≤ TEM ≤ 35°C	
2-Inaceitável			2	TEM < 10°C ou TEM > 35°C	
14. Sólidos Dissolvidos Totais (SDT):		VALOR-CLASSE			
1-Aceitável			1	SDT ≤ 500 mg/L	
2-Inaceitável			2	SDT > 500 mg/L	
15. Existência ou não de Barragem de Regularização (EBR):		VALOR-CLASSE			
1-Existe			1	Existe barragem no leito do rio	
2-Não Existe			2	Não existe barragem no leito do rio	
16. Existência ou não de Sistema de Aviso e Alerta (SAA):		VALOR-CLASSE			
1-Existe			1	Existe sistema de aviso e alerta	
2-Não Existe			2	Não existe sistema de aviso e alerta	
17. Existência ou não de Tratamento de Esgoto (ETE):		VALOR-CLASSE			
1-Existe			1	Existe tratamento de esgoto	
2-Não Existe			2	Não existe tratamento de esgoto	
18. Impacto Econômico a Jusante (IEJ):		VALOR-CLASSE			
1-Baixo			1	Sem danos a residências ou despesas < R\$ 200 mil	
2-Pequeno			2	Danificadas até 5 casas ou R\$ 200 mil ≤ despesas ≤ R\$ 1 milhão	
3-Médio			3	Danificadas de 6 a 49 casas ou R\$1 milhão < despesas ≤ R\$10 milhões	
4-Alto			4	Danificadas mais de 50 casas ou despesas > R\$10 milhões	
19. Impacto Social a Jusante (ISJ):		VALOR-CLASSE			
1-Baixo			1	População não é afetada	
2-Pequeno			2	Pessoas afetadas < 100 ou perda de capacidade produtiva < 10%	
3-Médio			3	100 ≤ pessoas afetadas ≤ 1000 ou 10% ≤ perda de capacidade produtiva ≤ 30%	
4-Alto			4	Pessoas afetadas > 1000 ou perda de capacidade produtiva > 30%	
20. Impacto Ambiental a Jusante (IAJ):		VALOR-CLASSE			
1-Baixo			1	Área afetada ≤ a 0,1km <sup>2</sup> ; duração do impacto ≤ 1 mês; nenhum efeito ecológico	
2-Pequeno			2	0,1km <sup>2</sup> < área afetada ≤ 1 km <sup>2</sup> ; 1 mês < duração do impacto ≤ 1 ano; inundação pode alterar a vegetação sem afetar muito a vida animal	
3-Médio			3	1km <sup>2</sup> < área afetada ≤ 10 km <sup>2</sup> ; 1 ano < duração do impacto ≤ 10 anos; são afetadas diversas espécies animais	
4-Alto			4	Área afetada > 10 km <sup>2</sup> ; duração do impacto > 10 anos; importantes efeitos ecológicos	
ÍNDICE DA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE RISCOS PARA RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS (IMARRHS)					
		Variável	Nota máxima	Peso Final (Quadro 59)	IMARRHS máximo
		Existência ou não de tratamento de esgoto (ETE)	2	0,07	1,05
		Presença de contaminantes orgânicos e inorgânicos (PCOI)	2		1,04
		Nível de demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	2	0,06	1,04
		Nível de oxigênio dissolvido (NOD)	2		1,04
		Nível de toxicidade em organismos aquáticos (NTO)	5		1,09
		Coliformes fecais (COF)	2		1,04
		Impacto ambiental a jusante (IAJ)	4		1,08
		Assoreamento ou acúmulo de sedimentos (ASS)	3		1,06
		Impacto social a jusante (ISJ)	4		1,07
		Altura do nível d'água (ANA)	3	0,05	1,06
		Estabilidade de taludes (EST)	3		1,06
		Nível de pH (NPH)	3		1,05
		Turbidez da água (TUA)	3		1,05
		Impacto econômico a jusante (IEJ)	4		1,07
		Existência ou não de sistemas de aviso e alerta (SAA)	2		1,03
		Cor da água (COA)	2		1,03
		Existência ou não de barragem de regularização (EBR)	2	0,04	1,03
		Velocidade do rio (VER)	3		1,05
		Temperatura (TEM)	2		1,03
		Sólidos dissolvidos totais (SDT)	2		1,03
		TOTAL		1	20,99
Reservatório ou Rio ?					
Reservatório					
Rio					
	<b>CLASSE DO RECURSO HÍDRICO:</b>	VALOR-CLASSE			
1-Ótima		18,89 a 20,99	Ausência de ameaça ou virtual impacto; condições próximas aos níveis naturais		
2-Bom		14,68 a 18,88	Existe um pequeno grau de ameaça ou impacto; as condições raramente divergem das condições naturais ou desejáveis		
3-Regular		5,22 a 14,67	As condições podem ser ocasionalmente ameaçadas ou impactadas; as condições às vezes afastam-se dos níveis naturais ou desejáveis		
4-Imprópria		0 a 5,21	As condições estão ameaçadas ou prejudicadas; as condições geralmente afastam-se dos níveis naturais ou desejáveis		

Fonte: O autor, 2023.