

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Elaboração de um guia técnico segundo normas nacionais e internacionais
Estudo de caso: Hidrogeração

Renato Perdival Bandeira de Moura

Campina Grande, Paraíba
Setembro de 2025

Renato Perdival Bandeira de Moura

Elaboração de um guia técnico segundo normas nacionais e internacionais
Estudo de caso: Hidrogeração

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, como exigência parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Huilman Sanca Sanca

Campina Grande, Paraíba

Setembro de 2025

Elaboração de um guia técnico segundo normas nacionais e internacionais
Estudo de caso: Hidrogeração

de Renato Perdival Bandeira de Moura

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, sendo aprovado em sua versão final pela banca examinadora:

gov.br
Documento assinado digitalmente
HUILMAN SANCA SANCA
Data: 02/10/2025 10:47:03-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Orientador(a): Prof. Dr. Huilman Sanca Sanca
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Convidado(a) Interno(a): Prof. Dr. Célio Anésio da Silva
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Campina Grande, Setembro de 2025

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por sustentar meus passos com saúde e sabedoria, e por me proporcionar oportunidades em cada etapa deste curso, bem como me abençoar com pessoas que foram essenciais na minha caminhada.

À minha mãe, Régia Suelena, por ter se dedicado incansavelmente à minha educação e por me ensinar, pelo exemplo, que perseverança e caráter valem mais do que qualquer atalho. Ao meu pai, Gledson Perdival, por sempre dar tudo de si para que eu tivesse as melhores condições de vida. Ao meu irmão, Gledson Júnior, por toda a parceria, pelas brincadeiras que viraram distração necessária, pela companhia nas horas puxadas e por me lembrar, do seu jeito, que dá pra seguir em frente mesmo rindo dos tropeços.

À minha noiva, e futura esposa, Sonaly Rodrigues, minha maior inspiração e parceria diária. Obrigado por acreditar em mim quando eu mesmo duvidei, por me incentivar a nunca desistir, por me apontar o caminho certo e por me desafiar, com amor e firmeza, a ser uma versão melhor de mim a cada dia. A tua força, generosidade e lealdade foram essenciais para que eu alcançasse esta etapa na vida. Este resultado também é teu.

Aos meus amigos Alysson Gabriel, Gustavo Rodrigues, João Pedro Melquiades, Kevin Martins, Victor Moreira, Vinícius Nóbrega e Vinícius Santos, que caminham comigo desde antes do curso e seguem ao meu lado após todo esse tempo. Obrigado por compartilharmos lutas e conquistas, por celebrarmos cada pequena vitória e, principalmente, por oferecermos um ao outro um ombro amigo nos momentos mais difíceis.

Aos meus companheiros de curso, pela convivência, pelas conversas de corredor, pelos grupos de estudo, pelas revisões de última hora e por tornarem a rotina mais leve. Em especial, aos colegas Douglas Gomes, Eduardo Luis, Eduardo Sátiro, Gabriel Marques, Gabriel Miranda, Rodrigo Gama e Rodrigo Toledo, por terem sido fundamentais no meu desenvolvimento pessoal e profissional dentro da universidade, a confiança e a amizade de vocês fizeram toda a diferença.

À UFCG, enquanto instituição pública que me acolheu, e aos professores e demais profissionais do curso de Engenharia Elétrica, pelo compromisso com o ensino, pela seriedade acadêmica e pela dedicação diária que permitiram que este percurso chegasse a um bom fim. Sou grato pelo conhecimento compartilhado, pelas oportunidades de aprendizado e pelo ambiente que me ajudou a amadurecer como estudante e como pessoa.

A todos mais que não foram aqui citados e que, de alguma forma, contribuíram para esta jornada, com uma palavra de incentivo, uma soluçaõ de dúvida, um café, um abraço ou um voto de confiança, o meu muito obrigado.

"Uma jornada de mil milhas começa com um único passo."

Laozi, *Dao De Jing*

RESUMO

Este trabalho sistematiza um roteiro para elaboração de manuais técnicos conforme normas nacionais e internacionais e demonstra sua aplicação em um estudo de caso. Partiu-se de um levantamento e síntese normativa (ABNT NBR 6023/6024/6027/6028/10719; ABNT NBR ISO 9001 e 10013; IEC/IEEE 82079-1), do qual se derivaram critérios de forma, conteúdo, usabilidade e gestão da informação documentada. A partir desse referencial, foram consolidadas a macroestrutura do guia, a especificação de formatação e os requisitos mínimos de instruções (linguagem, padronização de termos, hierarquia de seções, mensagens de segurança e controle de versões). Em seguida, o roteiro foi aplicado ao estudo de caso em geração hidrelétrica para validar a abordagem, abrangendo conceitos fundamentais, classificação de usinas, turbinas e seus sistemas auxiliares, geradores e reguladores. Os resultados confirmam a viabilidade de um processo replicável de elaboração que combina conformidade normativa, governança documental e clareza para o usuário final, oferecendo um guia que pode ser reutilizado em diferentes contextos organizacionais e atualizado de forma controlada.

Palavras-chave: elaboração de manuais; ABNT; ISO; IEC/IEEE; geração hidrelétrica.

ABSTRACT

This work systematizes a step-by-step approach to develop technical manuals in compliance with national and international standards and demonstrates its application through a case study. A normative survey and synthesis (ABNT NBR 6023/6024/6027/6028/10719; ABNT NBR ISO 9001 and 10013; IEC/IEEE 82079-1) were used to derive criteria for document form, content, usability, and documented information management. Based on this framework, the guide's macrostructure, formatting specification, and minimum instruction requirements (language, terminology standardization, section hierarchy, safety signaling, and version control) were consolidated. The approach was then applied to a hydropower case study to validate the method, covering fundamental concepts, plant classification, turbines and auxiliary systems, generators and governors. Results confirm a replicable development process that combines normative compliance, document governance, and user-oriented clarity, yielding a guide that can be reused across organizational contexts and updated under controlled change management.

Keywords: manual development; ABNT; ISO; IEC/IEEE; hydropower.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Diagrama da metodologia aplicada à pesquisa 11
Figura 2 – Esquema geral de uma usina hidrelétrica. 16
Figura 3 – Exemplos de danos causados por cavitação em componentes hidráulicos. 22
Figura 4 – Esquema ilustrativo do golpe de aríete. 23
Figura 5 – Arranjo fio d'água. 25
Figura 6 – Arranjo com reservatório de regularização. 25
Figura 7 – Arranjo reversível por bombeamento (PSH). 26
Figura 8 – Esquema geral de uma usina hidrelétrica. 26
Figura 9 – Campos de aplicação ($H \times Q$) para Pelton, Francis e Kaplan. 29
Figura 10 – Turbina Francis Horizontal Simples 30
Figura 11 – Esquema construtivo de turbina Francis vertical. 31
Figura 12 – Turbina Kaplan S Jusante. 32
Figura 13 – Esquema construtivo de turbina Kaplan de jusante. 34
Figura 14 – Turbina Pelton com múltiplos injetores. 35
Figura 15 – Esquema construtivo de turbina Pelton vertical. 36
Figura 16 – Rotor de pólos salientes. 40
Figura 17 – Exemplo de ilustração de estator e rotor. 42
Figura 18 – Unidade Hidráulica de Regulação de Velocidade (UHRV) — vista geral. 46
Figura 19 – Arquitetura exemplificativa de sistema de excitação com regulador de tensão. 47

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Exemplos de códigos de resfriamento (IEC 60034-6) 42
Tabela 2 – Exemplos de graus de proteção (IEC 60034-5) 43

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEP	*Best Efficiency Point* (Ponto de Melhor Eficiência)
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CFD	*Computational Fluid Dynamics* (Dinâmica dos Fluidos Computacional)
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
DOE	*U.S. Department of Energy* (Departamento de Energia dos EUA)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEC	*International Electrotechnical Commission*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IEA	*International Energy Agency*
IHA	*International Hydropower Association*
ISO	*International Organization for Standardization*
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PDCA	*Plan–Do–Check–Act* (Planejar–Executar–Verificar–Agir)
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PSH	*Pumped-Storage Hydropower* (usina reversível por bombeamento)
SGQ	Sistema de Gestão da Qualidade
SIN	Sistema Interligado Nacional
UHE	Usina Hidrelétrica
UHRV	Unidade Hidráulica de Regulação de Velocidade
USACE	*United States Army Corps of Engineers*
USBR	*United States Bureau of Reclamation*

Lista de símbolos

ρ	massa específica da água (kg/m^3)
g	aceleração da gravidade (m/s^2)
γ	peso específico da água (N/m^3)
Q	vazão volumétrica (m^3/s)
H_{L}	queda líquida efetiva na turbina (m)
H_{B}	queda bruta (m)
h_{perdas}	perdas de carga totais (m)
h_f	perda distribuída por atrito (Darcy–Weisbach) (m)
h_m	perdas localizadas (m)
f	fator de atrito de Darcy–Weisbach (adimensional)
L	comprimento do conduto/túnel (m)
D	diâmetro hidráulico do conduto (m)
v	velocidade média do escoamento (m/s)
v_i	velocidade média no elemento i (m/s)
K_i	coeficiente de perda localizada do elemento i (adimensional)
z_{montante}	cota do nível d'água a montante (m)
z_{jusante}	cota do nível d'água a jusante (m)
P_{el}	potência elétrica útil nos terminais do gerador (W)
$P_{\mathrm{eixo,turb}}$	potência de eixo fornecida pela turbina (W)
$P_{\mathrm{eixo,ger}}$	potência mecânica no eixo do gerador (W)
η_{global}	rendimento global do conjunto (adimensional)
η_{hid}	rendimento hidráulico da turbina (adimensional)
η_{mec}	rendimento mecânico (adimensional)

η_{el}	rendimento elétrico do gerador (adimensional)
p_{ref}	pressão absoluta na seção de referência (Pa)
p_v	pressão de vapor da água (Pa)
σ	coeficiente (índice) de Thoma para cavitação (adimensional)
a	celeridade da onda de pressão (m/s)
Δp	variação de pressão (Pa)
Δv	variação de velocidade (m/s)
A_s	área da seção da chaminé de equilíbrio (m^2)
A_t	área da seção do túnel/conduto (m^2)
z	variação do nível na chaminé (positiva para cima) (m)
T	período natural de oscilação da chaminé (s)
n_s	rotação específica (adimensional)
n_q	rotação específica (forma alternativa; adimensional)
n_{11}	invariante de velocidade (adimensional)
Q_{11}	invariante de vazão (adimensional)
$H_{\mathrm{líq}}$	queda líquida (variação de notação) (m)
k	razão de velocidades periférica/jato (u/V_j) (adimensional)
u	velocidade periférica da roda (m/s)
V_j	velocidade do jato (m/s)

Sumário

Agradecimentos **3**

1 INTRODUÇÃO **1**

1.1 Objetivos **3**

1.1.1 Objetivo geral 3

1.1.2 Objetivos específicos 3

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA **4**

2.1 ABNT **4**

2.1.1 ABNT NBR 10719:2015 — Informação e documentação — Relatório técnico e/ou científico — Apresentação 5

2.1.2 ABNT NBR 6023:2018 — Informação e documentação — Referências — Elaboração 6

2.1.3 ABNT NBR 6024:2012 — Informação e documentação — Numeração progressiva das seções de um documento — Apresentação 6

2.1.4 ABNT NBR 6027:2021 — Informação e documentação — Sumário — Apresentação 7

2.1.5 ABNT NBR 6028:2021 — Informação e documentação — Resumo, resenha e recensão — Apresentação 7

2.1.6 ABNT NBR 10520:2023 — Informação e documentação — Citações em documentos — Apresentação 7

2.2 Normas ISO **8**

2.2.1 ABNT NBR ISO 9001:2015 — Sistema de gestão da qualidade — Requisitos 8

2.2.2 ABNT NBR ISO 10013:2021 — Sistemas de gestão da qualidade — Orientação para informação documentada 9

2.3 Normas IEC/IEEE **10**

2.3.1 IEC/IEEE 82079-1:2019 — Preparação de informações para uso (instruções de uso) de produtos — Parte 1: Princípios e requisitos gerais 10

3 METODOLOGIA **11**

3.1 Síntese normativa para elaboração do manual **11**

3.2 Definição da estrutura do manual **12**

3.2.1 Organização do Conteúdo 12

3.2.2 Estrutura Sugerida do Manual 13

3.2.3 Requisitos Mínimos Atendidos 13

3.3 Visão geral **13**

4 RESULTADOS . . . 14
4.1 Macroestrutura confirmada do manual . . . 14
4.1.1 Especificação de formatação do manual . . . 15
4.2 Panorama da hidrogeração . . . 15
4.2.1 Histórico e evolução da hidroeletricidade . . . 16
4.2.2 Cadeia de conversão de energia . . . 17
4.3 Conceitos Fundamentais . . . 18
4.3.1 Potência hidráulica . . . 18
4.3.2 Quedas . . . 18
4.3.2.1 Queda bruta . . . 19
4.3.2.2 Perdas de carga (h_{perdas}) . . . 19
4.3.2.3 Queda líquida . . . 19
4.3.3 Rendimento global . . . 19
4.3.3.1 Rendimento hidráulico da turbina (η_{hid}) . . . 20
4.3.3.2 Rendimento mecânico (η_{mec}) . . . 20
4.3.3.3 Rendimento elétrico do gerador (η_{el}) . . . 20
4.3.3.4 Implicações práticas . . . 20
4.3.4 Cavitação . . . 20
4.3.4.1 Formas típicas e regiões críticas . . . 21
4.3.4.2 Prevenção e mitigação . . . 21
4.3.4.3 Impactos operacionais e de integridade . . . 21
4.3.5 Golpe de aríete . . . 22
4.3.5.1 Aplicação prática . . . 22
4.3.5.2 Integração com a operação da unidade . . . 23
4.3.6 Chaminé de equilíbrio . . . 23
4.3.6.1 Integração com golpe de aríete e operação . . . 23
4.4 Usinas Hidrelétricas . . . 24
4.4.1 Classificação por porte . . . 24
4.4.2 Classificação por arranjo . . . 24
4.4.3 Estruturas civis principais . . . 26
4.4.3.1 Barragem . . . 27
4.4.3.2 Tomada d'água e grades . . . 27
4.4.3.3 Condutos forçados . . . 27
4.4.3.4 Vertedouros . . . 27
4.4.3.5 Vazão sanitária . . . 28
4.4.3.6 Casa de força e circuito de fuga . . . 28
4.5 Turbinas Hidráulicas . . . 28
4.5.1 Classificação geral, critérios de seleção e curvas características . . . 28
4.5.2 Francis . . . 29

4.5.2.1 Conceito e arranjos construtivos . . . 29
4.5.2.2 Critérios de seleção e integração . . . 30
4.5.2.3 Curvas características, BEP e operação . . . 30
4.5.2.4 Componentes e funções . . . 30
4.5.3 Kaplan . . . 32
4.5.3.1 Conceito e arranjos . . . 32
4.5.3.2 Seleção e integração . . . 32
4.5.3.3 Curvas, BEP e operação . . . 33
4.5.3.4 Componentes . . . 33
4.5.4 Pelton . . . 34
4.5.4.1 Conceito e arranjos . . . 34
4.5.4.2 Seleção preliminar . . . 35
4.5.4.3 Curvas e parcialização . . . 35
4.5.4.4 Componentes . . . 35
4.5.4.5 Cavitação e erosão . . . 36
4.6 Sistemas auxiliares das turbinas (SAT) . . . 37
4.6.1 Unidade Hidráulica de Regulação de Velocidade (UHRV) . . . 37
4.6.2 Lubrificação, mancais e refrigeração . . . 37
4.6.3 Vedações e integridade ambiental . . . 37
4.6.4 Drenagem, esgotamento e ventilações . . . 37
4.6.5 Instrumentação, monitoramento e intertravamentos . . . 38
4.7 Geradores Elétricos . . . 38
4.7.1 Princípios de funcionamento . . . 39
4.7.1.1 Fluxo, tensão e papel da excitação . . . 39
4.7.1.2 Operação em carga e controle do ponto operante . . . 39
4.7.1.3 Sincronismo e grandezas de supervisão . . . 40
4.7.1.4 Rotores de polos salientes e rotores lisos . . . 40
4.7.1.5 Considerações térmicas, ventilação e eficiência . . . 41
4.7.2 Construção e arranjos . . . 41
4.7.2.1 Estator . . . 41
4.7.2.2 Rotor . . . 41
4.7.2.3 Ventilação e arrefecimento . . . 42
4.7.2.4 Grau de Proteção . . . 43
4.7.2.5 Sistema de excitação *brushless* e estático . . . 43
4.7.3 Operação, sincronismo e modos . . . 44
4.7.3.1 Sequência de partida e sincronismo . . . 44
4.7.3.2 Modos de operação: paralelo à rede e operação ilhada . . . 44
4.7.3.3 Sobrevelocidade e disparos de proteção . . . 44
4.8 Reguladores e Sistemas de Controle . . . 45

4.8.1 Visão geral e arquitetura de controle 45
4.8.2 Regulador de velocidade e controle hidráulico 45
4.8.2.1 Estrutura de controle e requisitos dinâmicos 46
4.8.2.2 Atuação hidráulica e UHRV 46
4.8.2.3 Limites operativos do regulador 46
4.8.3 Sistema de excitação e regulador de tensão 47
4.8.3.1 Funções do regulador de tensão e modos operativos 47
4.8.3.2 Limitadores do AVR e coordenação com proteções 48

5 CONCLUSÃO 49

REFERÊNCIAS 51

1 Introdução

Um manual técnico é, antes de tudo, um instrumento da comunicação para transformar conhecimento especializado em orientações seguras e direcionadas. Conforme a *International Energy Agency* do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEC/IEEE), a literatura de "informações para uso", ele deve explicitar finalidade, público-alvo e contexto de aplicação, organizando conteúdos conceituais, instrucionais e de referência de forma coerente e verificável (IEC/IEEE, 2019). Em termos práticos, isso significa fornecer instruções que possam ser seguidas passo a passo e verificadas por critérios de aceitação.

A qualidade desse tipo de documento nasce com o foco no usuário: análise de perfis, levando em consideração a experiência prévia ou o vocabulário técnico, por exemplo, ambientes de uso, como em campo, oficina ou escritório e riscos associados. A estrutura visa facilitar a navegação, com sumário intuitivo e indicações claras, enquanto a linguagem deve ser direta, sem ambiguidade, com o uso de termos, símbolos e palavras-sinal de segurança, quando aplicável. Além disso, realizar revisões técnicas periódicas ajudam a verificar se o conteúdo é de fácil compreensão e direcionado a situações reais (IEC/IEEE, 2019).

Nesse contexto, bons manuais não "surgem prontos", eles são criados, atualizados e controlados ao longo do tempo. As diretrizes de informação documentada orientam definição de escopo, responsabilidades por autoria, revisão e aprovação, controle de versões, acessibilidade e proteção contra alterações não autorizadas. Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), esses mecanismos asseguram rastreabilidade, consistência e disponibilidade do conteúdo certo, na versão certa e para as pessoas certas (ABNT, 2021c).

Para a organização, dentre os benefícios estão: redução de erros operacionais, otimização do treinamento, aumento do conhecimento crítico e conformidade com requisitos internos e externos. Quando o manual é projetado com foco em tarefas reais e mantido por um processo de melhoria contínua (incorporando *feedback* interno), ele deixa de ser apenas um repositório de informação e passa a atuar como ferramenta dinâmica de desempenho e segurança (ABNT, 2021c).

Partindo dessas bases, este trabalho tem dois propósitos complementares, apresentar, de forma didática e passo a passo, como elaborar um manual técnico em geral, bem como demonstrar a aplicação dessa abordagem por meio da elaboração de um guia técnico introdutório em hidrogeração. Assim, após expor os fundamentos para a escrita de manuais, será possível apresentar um documento com conteúdo prático e relevante para o cenário nacional, dado a importância de ambas abordagens para os profissionais de hoje em dia.

Como justificativa para a seleção do tema mencionado, ressalta-se que o Brasil consolidou sua matriz elétrica aproveitando uma de suas maiores vantagens naturais, a extensa rede hidrográfica com elevado potencial de geração. Em 2025, segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a fonte hídrica responde por cerca de 44% da capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional (SIN), com aproximadamente 108 GW de potência hidráulica, permanecendo como pilar de segurança energética e de serviços de flexibilidade para o despacho do sistema (ONS, 2025). Essa predominância se explica por atributos como baixo custo marginal, longa vida útil dos ativos e capacidade de regular vazões e potência ao longo do tempo.

Embora historicamente dominada por grandes Usinas Hidrelétricas (UHEs), a expansão recente tem sido reforçada por empreendimentos de menor porte. Nesse contexto, conforme dados oficiais de maio de 2025 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o cenário indicava que, cerca de 5,9 GW de PCHs e 0,87 GW de CGHs estão em operação, revelando a relevância desse segmento para a capilaridade, a diversificação regional e a geração próxima aos centros de carga (ANEEL, 2025a). Esses projetos tendem a apresentar ciclos de implantação mais ágeis e impactos socioambientais menores, além de contribuírem para reduzir perdas elétricas e fortalecer a resiliência da rede.

A crescente participação de fontes variáveis (eólica e solar) eleva a importância da energia firme e dos serviços ancilares providos pela hidroeletricidade. A operação flexível das usinas contribui para a estabilização da frequência, controle de tensão e atendimento a picos de demanda. Nesse contexto, a manutenção e a expansão do parque hídrico seguem estratégicas para garantir confiabilidade e previsibilidade de suprimento, especialmente em cenários de maior volatilidade hidrológica e de carga.

Em 22 de agosto de 2025, o setor deu um passo significativo nessa direção com a realização do Leilão de Energia Nova A-5, exclusivo para hidrelétricas. O certame realizado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) contratou 65 empreendimentos somando 815,6 MW de potência, com preço médio de R$ 392,84/MWh e deságio de 3,16%, estimando benefício de R$ 864,8 milhões aos consumidores ao longo dos contratos (ANEEL, 2025b; CCEE, 2025). Conforme dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), os produtos negociados preveem suprimento por 20 anos, reforçando a expansão de energia firme e distribuída no horizonte de atendimento (EPE, 2025b). Trata-se do maior volume já contratado em um leilão dedicado à fonte hidráulica de pequeno e médio porte desde a criação desse mecanismo.

Esse movimento de retomada exige soluções de engenharia integradas. A indústria nacional conta com fornecedores capazes de entregar arranjos *turn-key*, ou seja, do grupo turbina-gerador aos sistemas de regulação, controle, excitação e auxiliares, o que demanda equipes técnicas bem preparadas para projetar, comissionar e operar sistemas complexos. É nesse ponto que se insere o presente trabalho: desenvolver um guia técnico introdutório para

acelerar a integração de novos colaboradores em hidrogeração, conectando fundamentos de máquinas hidráulicas e sistemas associados à prática industrial da operação e manutenção, de forma padronizada e aderente às necessidades do setor.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver e documentar uma abordagem prática para a elaboração de manuais técnicos e aplicá-la na produção de um guia introdutório para hidrogeração, adequado ao treinamento e à integração de novos colaboradores.

1.1.2 Objetivos específicos

- Definir premissas de elaboração de manuais: finalidade, público-alvo, contexto de uso e objetivos de aprendizagem.
- Estabelecer macroestrutura e padrões de linguagem com critérios de aceitação para instruções passo a passo.
- Definir os padrões de formatação do documento, tais como hierarquia e numeração de títulos, apresentação de figuras e tabelas, legendas, citações e referências, visando garantir consistência visual e aderência às diretrizes adotadas.
- Mapear os conteúdos essenciais ao *onboarding* em hidrogeração e seus conceitos fundamentais.
- Estruturar o guia de hidrogeração em seções coerentes com o uso prático.

2 Fundamentação Teórica

A elaboração de manuais técnicos requer a obediência a um conjunto de normas que assegurem clareza, usabilidade e rastreabilidade da informação. Nesse escopo, as diretrizes nacionais tratam da forma e da apresentação do documento, incluindo estrutura de elementos pré-textuais, textuais e pós-textuais, numeração progressiva de seções, composição de resumos e sumários e padronização das referências, enquanto os referenciais internacionais de gestão da qualidade organizam o ciclo de vida da informação documentada, com processos de criação, análise crítica, aprovação, distribuição, atualização, controle de versões e retenção.

A junção das diretrizes da ABNT, dos referenciais internacionais de gestão da qualidade e dos princípios de informações para uso, permitem produzir manuais com conformidade formal, conteúdo verificável e governança documental, resultando em orientações aplicáveis e auditáveis em diferentes contextos organizacionais. Ao longo deste capítulo, esses critérios são reunidos e apresentados quanto à clareza, padronização e gestão de mudanças, que orientam a construção do guia técnico.

Dessa forma, o levantamento normativo e bibliográfico tem como objetivo identificar as diretrizes técnicas que orientam a construção de manuais técnicos que ofereçam embasamento à organização do conteúdo. A consulta à ABNT e aos documentos internacionais garantem que o manual esteja em conformidade com padrões reconhecidos e seja aplicável à realidade prática.

2.1 ABNT

A ABNT é uma entidade privada e sem fins lucrativos, responsável pela elaboração das Normas Brasileiras (NBR). Também atua em avaliação da conformidade, dispondo de programas de certificação de produtos, de sistemas de gestão e de rotulagem ambiental. Essas atividades são fundamentadas em guias e princípios técnicos internacionalmente aceitos e sustentadas por uma estrutura técnica e por corpo de auditores multidisciplinar, o que garante credibilidade, ética e reconhecimento dos serviços prestados (ABNT, 2025). Nesse contexto, são detalhadas a seguir as principais normas direcionadas à elaboração de manuais técnicos.

2.1.1 ABNT NBR 10719:2015 — Informação e documentação — Relatório técnico e/ou científico — Apresentação

A NBR 10719:2015 estabelece diretrizes para a apresentação de relatórios técnico-científicos, contemplando sua estrutura, organização e padronização de elementos textuais e gráficos (ABNT, 2015a). Sua aplicação abrange diferentes tipos de relatórios, incluindo administrativos e de atividades. A norma estrutura o documento em dois grandes grupos, com elementos distribuídos entre a parte externa e a parte interna. A parte externa orienta a elaboração da capa, identificação da instituição responsável, título, subtítulo e, quando aplicável, classificação de segurança. A parte interna apresenta três subgrupos, elementos pré-textuais, textuais e pós-textuais.

No primeiro subgrupo incluem-se, como elementos obrigatórios, folha de rosto, resumo (ABNT, 2021b) e sumário (ABNT, 2021a), e, como elementos opcionais, listas de ilustrações, como figuras, gráficos e quadros, listas de tabelas, lista de siglas e lista de símbolos, que podem ser adaptados ao contexto do manual. Vale ressaltar que, no verso da folha de rosto, pode ser apresentada, de forma opcional, a equipe técnica e a qualificação de cada contribuinte, enquanto no anverso devem constar:

- nome do órgão ou entidade responsável que solicitou ou gerou o relatório;
- título do projeto, programa ou plano ao qual o relatório se relaciona;
- título do relatório;
- subtítulo, se houver;
- número ou código do documento, se aplicável;
- nome do autor, podendo incluir titulação, qualificação ou função;
- local (cidade) da instituição responsável e/ou solicitante e ano de publicação.

Quanto às regras gerais de apresentação adotadas neste estudo, recomenda-se espaçamento simples para o documento. As margens para o anverso aplicam-se 3 cm à esquerda e superior e de 2 cm à direita e inferior, enquanto no verso aplica-se 3 cm à direita e superior e 2 cm à esquerda e inferior. Junto a isso, utilizam-se também fonte tamanho 12 para o texto, e fontes menores e padronizadas para citações com mais de três linhas, notas de rodapé, paginação, legendas e fontes de ilustrações e tabelas.

Em relação à paginação, as folhas ou páginas pré-textuais devem ser contadas, mas não numeradas. A numeração sequencial em algarismos arábicos inicia-se a partir da primeira página textual, e inclue apêndices e anexos. Os títulos sem indicativo numérico devem ser centralizados. As siglas, quando mencionadas pela primeira vez, devem vir entre parênteses, precedidas do nome por extenso. As fórmulas devem ser destacadas e, quando necessário, numeradas com algarismos arábicos entre parênteses, alinhados à direita. Qualquer tipo de ilustração deve conter identificação na parte superior, precedida da palavra designativa correspondente, seguida do número de ordem no texto, travessão e

respectivo título.

2.1.2 ABNT NBR 6023:2018 — Informação e documentação — Referências — Elaboração

De acordo com a NBR 6023:2018, a referência deve ser composta por elementos essenciais e, quando necessário, elementos complementares, ambos extraídos diretamente do documento consultado (ABNT, 2018). Os elementos essenciais correspondem às informações indispensáveis para a identificação do documento, enquanto os complementares podem ser acrescentados para melhor detalhamento.

Quanto à localização, as referências podem ser apresentadas em rodapé, ao final de textos, como lista própria ou antecedendo resumos. Devem ser elaboradas em espaço simples, alinhadas à margem esquerda e separadas entre si por um espaço simples em branco. Quando inseridas em notas de rodapé, também devem respeitar o alinhamento à margem esquerda.

Para documentos em meio eletrônico, deve-se registrar o endereço eletrônico, precedido das expressões "Disponível em:" e "Acesso em:". As referências, quando organizadas em lista única, devem manter padronização quanto ao uso de recursos tipográficos, como negrito, itálico ou sublinhado, e quanto à inclusão de informações complementares. A seguir, apresentam-se alguns modelos de referência:

- **Livros**: SOBRENOME, Nome. *Título do livro em negrito*. Edição. Local: Editora, ano.
- **Capítulo de livro**: SOBRENOME, Nome. Título do capítulo. In: SOBRENOME, Nome (Org.). *Título do livro em negrito*. Local: Editora, ano. p. xx–xx.
- **Trabalhos acadêmicos**: SOBRENOME, Nome. *Título do trabalho em negrito*. Tipo do trabalho. Grau e curso (entre parênteses), vinculação acadêmica, local e data de apresentação ou defesa.
- **Artigo científico**: SOBRENOME, Nome. Título do artigo. *Título do periódico em negrito*, local, v. x, n. x, p. xx–xx, ano.
- **Documento jurídico (legislação)**: JURISDIÇÃO. Tipo e número, data. Ementa (ou título da norma). *Fonte oficial em negrito*, local, data de publicação.

2.1.3 ABNT NBR 6024:2012 — Informação e documentação — Numeração progressiva das seções de um documento — Apresentação

De acordo com a NBR 6024:2012, a numeração progressiva das seções de um documento deve ser realizada com algarismos arábicos, limitada até a seção quinária (5º nível), com os níveis separados por ponto, por exemplo, 3, 3.1, 3.1.1, e o título da seção imediatamente após o indicativo numérico, alinhado à margem esquerda e separado por um

espaço (ABNT, 2012). É permitido o uso de recursos tipográficos, como letras maiúsculas, negrito, itálico ou sublinhado, conforme a padronização adotada no trabalho.

Para os casos em que diversos assuntos sem título próprio estejam reunidos em uma mesma seção, recomenda-se a utilização de alíneas, indicadas alfabeticamente, em letra minúscula, seguidas de parêntese (ex.: *a)*, *b)*).

2.1.4 ABNT NBR 6027:2021 — Informação e documentação — Sumário — Apresentação

De acordo com a NBR 6027:2021, a estrutura do sumário deve apresentar os indicativos numéricos das seções alinhados à margem esquerda, seguidos dos respectivos títulos e subtítulos, quando houver, e a paginação alinhada à margem direita (ABNT, 2021a). A palavra "Sumário", independentemente do idioma, deve aparecer centralizada, utilizando o mesmo tipo de fonte adotado para as seções primárias do documento. Recomenda-se que a hierarquia dos itens seja destacada no sumário de acordo com a mesma padronização tipográfica utilizada nas seções correspondentes do texto. Ressalta-se que os elementos pré-textuais não devem ser incluídos no sumário.

2.1.5 ABNT NBR 6028:2021 — Informação e documentação — Resumo, resenha e recensão — Apresentação

De acordo com a NBR 6028:2021, o resumo deve apresentar, de forma clara, precisa e objetiva, os aspectos mais relevantes do documento, possibilitando ao leitor uma visão geral do conteúdo sem a necessidade de consulta integral ao texto. O resumo deve ser redigido em um único parágrafo, de forma sucinta, destacando o conteúdo do trabalho, recomenda-se o emprego de verbos na terceira pessoa. As palavras-chave devem ser apresentadas logo abaixo do resumo, antecedidas da expressão "Palavras-chave:", separadas por ponto e vírgula e finalizadas por ponto, iniciando com letra minúscula, exceto nomes próprios e científicos.

Quanto à extensão, convém que os resumos tenham de 150 a 500 palavras para trabalhos acadêmicos e relatórios técnicos e/ou científicos, de 100 a 250 palavras para artigos de periódicos e de 50 a 100 palavras para os demais documentos (ABNT, 2021b).

2.1.6 ABNT NBR 10520:2023 — Informação e documentação — Citações em documentos — Apresentação

A citação deve permitir correlação com a lista de referências ou com notas explicativas (ABNT, 2023). As citações diretas de até três linhas apresentam-se no corpo do texto, entre aspas duplas, as citações diretas com mais de três linhas devem ser destacadas

em parágrafo próprio, com recuo de 4 cm em relação à margem esquerda, espaço simples, sem aspas e em fonte menor que a do texto. Nas citações indiretas, a indicação de página é opcional.

No caso de citação de citação, os elementos devem ser indicados na seguinte ordem: autoria, ou a primeira palavra do título, quando não houver autoria, data, página do documento original, quando houver, a expressão *apud*, seguida de autoria, data e página da fonte consultada. Ressalta-se que o ponto final encerra a frase e não a citação.

Fontes não publicadas, como palestras, discursos e comunicações, devem ser indicadas no texto ou em nota, com a responsabilidade conforme a autoria: para pessoa física, usa-se o sobrenome, para pessoa jurídica, o nome completo ou sigla, na ausência de autoria, usa-se o título, com quatro ou mais autores, cita-se apenas o primeiro seguido de et al., mas todos devem constar na lista de referências.

2.2 Normas ISO

Por outro lado, no contexto internacional, a *International Organization for Standardization* (ISO) define padrões internacionais e traz orientações para as empresas quanto à adoção de práticas sustentáveis e éticas. A família ISO 9000 é a mais conhecida nesse âmbito, direcionada aos Sistemas de Gestão da Qualidade (SGQ) e, especificamente, a ISO 9001 orienta organizações de diferentes portes e setores a aprimorar seu desempenho, atender de forma consistente às expectativas dos clientes e evidenciar o compromisso com a qualidade (ABNT, 2015b).

2.2.1 ABNT NBR ISO 9001:2015 — Sistema de gestão da qualidade — Requisitos

A adoção de um Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ) é uma decisão estratégica para qualquer organização, pois contribui diretamente para a melhoria do desempenho global, da comunicação interna e da eficiência dos processos. A ABNT NBR ISO 9001 adota a abordagem de processos, incorpora o ciclo PDCA e promove o pensamento baseado em risco, permitindo um gerenciamento mais eficaz de recursos e atividades e orientando ações planejadas que reduzam incertezas e favoreçam a obtenção de resultados (ABNT, 2015b). O atendimento aos requisitos da norma representa um desafio, mas também uma oportunidade para práticas de melhoria contínua e ações corretivas.

Para estabelecer o escopo do SGQ, a organização deve considerar seus limites de aplicabilidade, levando em conta fatores internos e externos, os requisitos das partes interessadas e a natureza de seus produtos e serviços. Esse escopo deve ser documentado, mantido atualizado e disponibilizado, de modo a sustentar os processos internos e asse-

gurar sua execução conforme o planejado. A melhoria contínua do sistema é essencial, podendo envolver novas tecnologias e práticas inovadoras que atendam às necessidades da organização e de seus clientes. Além disso, é responsabilidade da organização prover recursos para monitoramento e medição de objetivos, incluindo o uso de manuais técnicos como instrumentos de apoio e padronização de processos.

Um aspecto fundamental da norma é o conhecimento organizacional, entendido como o conhecimento específico adquirido ao longo das experiências da organização. Esse conhecimento deve ser mantido e compartilhado para apoiar o alcance dos objetivos estratégicos, podendo ter origem em fontes internas, como projetos, lições aprendidas, e externas, como normas técnicas, conferências. A organização deve identificar as competências necessárias para colaboradores cujas atividades influenciam o desempenho do SGQ, oferecer treinamentos e outras formas de capacitação e avaliar periodicamente a eficácia dessas ações (ABNT, 2015b).

2.2.2 ABNT NBR ISO 10013:2021 — Sistemas de gestão da qualidade — Orientação para informação documentada

Ao detalhar a família de normas ISO, a ABNT NBR ISO 10013 destaca-se por tratar especificamente da informação documentada, compreendida como o conjunto de informações e registros que descrevem as atividades de uma organização, ou de parte delas, considerando a natureza dos produtos e serviços, os processos, os requisitos contratuais, estatutários e regulamentares, bem como o contexto organizacional (ABNT, 2021c). Essa informação documentada pode ser estruturada e apresentada de diferentes formas, de acordo com as necessidades da organização e fatores como liderança, resultados pretendidos, requisitos legais e expectativas das partes interessadas. Para garantir uniformidade e clareza, a norma recomenda vocabulário padronizado e alinhado às definições da ABNT NBR ISO 9000.

No contexto da elaboração de um manual técnico de hidrogeração voltado a novos colaboradores, a aplicação da ABNT NBR ISO 10013 é estratégica, pois contribui para transformar o documento em fonte de conhecimento organizacional. Seguindo suas diretrizes, o manual apresenta com clareza propósito, aplicação e escopo das atividades, e organiza o conteúdo em seções lógicas e hierarquizadas, facilitando a aprendizagem e a integração dos colaboradores. A padronização de termos, gráficos, figuras e tabelas assegura uniformidade e consistência para evitar ambiguidades técnicas, fundamentais em um setor com riscos operacionais e alta complexidade.

2.3 Normas IEC/IEEE

Dentre as normas desses organismos, destaca-se a IEC/IEEE 82079-1:2019, norma internacional que estabelece princípios e requisitos gerais para a preparação de informações para uso por usuários, aplicáveis tanto a sistemas complexos e críticos para a segurança, por exemplo, plantas industriais, quanto a produtos de consumo simples, por exemplo, uma lata de tinta, a softwares e a equipamentos de teste especializados. Esse documento é direcionado àqueles que preparam informações para uso (IEC/IEEE, 2019).

2.3.1 IEC/IEEE 82079-1:2019 — Preparação de informações para uso (instruções de uso) de produtos — Parte 1: Princípios e requisitos gerais

A IEC/IEEE 82079-1 estabelece princípios fundamentais para a seleção de conteúdo, a estrutura e o formato das informações para uso, servindo como referência internacional para a elaboração de manuais técnicos (IEC/IEEE, 2019). Entre os princípios, destacam-se a definição clara da finalidade da informação, abrangendo conteúdos conceituais, instrucionais e de referência, para que o usuário compreenda não apenas o "como", mas também o "porquê" das atividades.

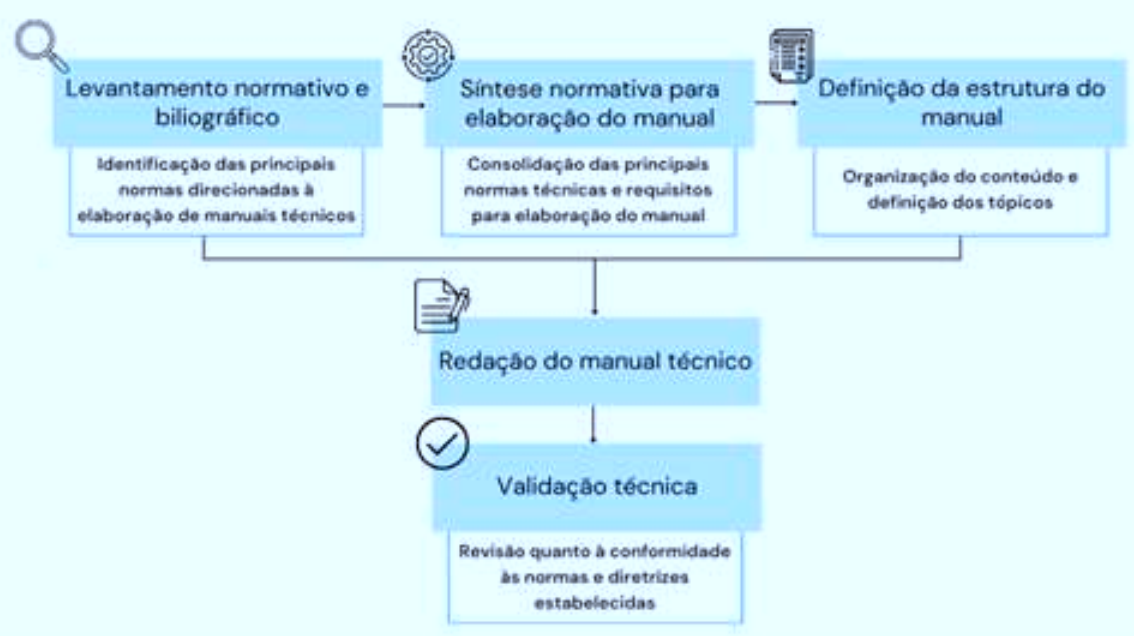
A norma enfatiza a qualidade da informação, que deve atender às necessidades do público-alvo e obedecer a critérios como integridade, correção, concisão, consistência, compreensibilidade, acessibilidade e minimalismo, evitando excesso que gere confusão ou sobrecarga cognitiva (IEC/IEEE, 2019). Também recomenda processos estruturados para o gerenciamento do conteúdo, contemplando planejamento, projeto, produção, manutenção e atualização contínua.

Quanto à estruturação das informações para uso, a norma orienta que os documentos sejam organizados de maneira a melhorar a usabilidade e a compreensão, oferecendo recursos que facilitem a pesquisa, a navegação e a interpretação inequívoca do conteúdo. Para manuais técnicos, isso implica apresentar as informações de forma lógica e hierárquica, com seções bem definidas e indicativos claros, incluindo, no início, informações preliminares, como visão geral do propósito, definições de termos técnicos e explicações de conceitos essenciais não detalhados em outro local.

3 Metodologia

A fim de alcançar os objetivos propostos nessa pesquisa e a partir dos fundamentos teóricos apresentados no capítulo anterior, a metodologia utilizada é composta por cinco etapas, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Diagrama da metodologia aplicada à pesquisa



Fonte: Autoria própria (2025).

Para a construção do manual técnico introdutório para novos colaboradores na área de hidrogeração, primeiramente foi elaborado um estudo comparativo das normas técnicas nacionais e internacionais relacionadas à documentação, elaboração de manuais e gestão da qualidade (IEC/IEEE, 2019).

A partir desse levantamento, foram definidos os critérios de estruturação e formatação do documento, bem como os elementos mínimos necessários para garantir a clareza, a padronização e a usabilidade. Em seguida, realizou-se a síntese normativa para estabelecer diretrizes práticas aplicáveis ao contexto do manual. Por fim, propôs-se a estrutura do manual, incluindo a organização do conteúdo em seções, a definição de elementos pré-textuais e pós-textuais, e os requisitos mínimos que devem ser atendidos (ABNT, 2021c).

3.1 Síntese normativa para elaboração do manual

Para a elaboração do manual técnico de hidrogeração destinado a novos colaboradores, foram consolidadas as principais diretrizes de normas nacionais, internacionais e de

sistemas de gestão da qualidade em um único documento. Essa abordagem permite integrar recomendações sobre estrutura, conteúdo, formatação, clareza e gestão da informação, garantindo que o manual seja consistente, compreensível e seguro para os usuários finais.

A escolha das normas seguiu critérios específicos. As normas ABNT, como a NBR 6023 (ABNT, 2018) e a NBR 6024 (ABNT, 2012), bem como a NBR 6027 para sumário (ABNT, 2021a), foram adotadas por fornecerem orientações claras sobre a estrutura formal do documento, padronização de seções, sumário, títulos e referências bibliográficas, garantindo organização lógica e fácil consulta.

Já as normas da ISO, em especial a ISO 9001 (ABNT, 2015b) e a ISO 10013 (ABNT, 2021c), foram utilizadas para incorporar princípios de gestão da qualidade e de informação documentada, assegurando que o manual não apenas registre procedimentos, mas também organize o conhecimento organizacional, defina responsabilidades, controle versões e promova a melhoria contínua.

Por fim, normas internacionais específicas de elaboração de manuais, como a IEC/IEEE 82079-1 (IEC/IEEE, 2019), foram incluídas por fornecerem diretrizes sobre clareza, usabilidade, padronização gráfica e adequação ao público-alvo, garantindo que o manual seja funcional e seguro em operações de hidrogeração.

A partir dessas normas, definiram-se os requisitos mínimos que o manual deve atender. Entre eles, destacam-se a clareza das instruções e dos conceitos técnicos, a padronização de títulos, seções, figuras, tabelas e terminologia e a aplicabilidade, garantindo que as informações possam ser utilizadas de forma prática por novos colaboradores, independentemente do nível de experiência prévia. Esse conjunto de requisitos assegura que o manual seja não apenas um documento de referência, mas também uma ferramenta efetiva de treinamento, integração e suporte à operação segura e eficiente dos sistemas de hidrogeração.

3.2 Definição da estrutura do manual

Para garantir que o manual técnico atenda às necessidades de uso, treinamento e padronização, foi definida a estrutura que organiza o conteúdo em seções e subseções coerentes com as práticas de documentação técnica. Essa estrutura considera tanto os requisitos das normas (ABNT, ISO, IEC/IEEE) quanto os requisitos de gestão da qualidade e usabilidade.

3.2.1 Organização do Conteúdo

O conteúdo do manual foi estruturado de forma lógica e hierárquica, permitindo que os colaboradores acessem rapidamente as informações de que necessitam. A sequência

de seções segue recomendações de normas internacionais para informação documentada (ABNT, 2021c) e para informações para uso (IEC/IEEE, 2019).

3.2.2 Estrutura Sugerida do Manual

O manual, de forma geral, será composto pelas seguintes seções principais:

- **Introdução**: apresenta o objetivo do manual, o público-alvo e a sua finalidade.
- **Escopo**: define os limites do manual, os processos e atividades abrangidos.
- **Fundamentos Técnicos**: consolida os princípios e definições necessários.
- **Componentes Principais**: descrição dos componentes e seus prioncípios.
- **Glossário**: consolida termos técnicos, siglas e abreviações utilizados no manual.

A estrutura do manual será adaptada ao contexto da hidrogeração, considerando que os principais componentes do sistema serão detalhados em seções seguintes do trabalho. Cada seção integra conhecimento técnico e conceitos fundamentais, seguindo princípios de usabilidade e compreensão recomendados para informações para uso (IEC/IEEE, 2019).

3.2.3 Requisitos Mínimos Atendidos

Com base nas normas analisadas, o manual deve atender aos seguintes requisitos mínimos:

- **Clareza**: linguagem padronizada e instruções compreensíveis (IEC/IEEE, 2019).
- **Padronização**: uso consistente de elementos textuais e gráficos (ABNT, 2012).
- **Aplicabilidade**: informações práticas e diretamente aplicáveis (ABNT, 2021c).

Essa estrutura garante que o manual seja uma ferramenta eficaz de treinamento, suporte operacional e referência técnica, alinhando diretrizas científicas à aplicabilidade prática, em conformidade com as normas nacionais e internacionais selecionadas.

3.3 Visão geral

O manual concebido neste trabalho é um instrumento de nivelamento técnico e de consulta rápida voltado ao ingresso de novos colaboradores em hidrogeração, abrangendo CGH, PCH e UHE. O conteúdo foi organizado para apoiar a execução de tarefas e acelerar o processo de aprendizagem, reunindo, em sequência lógica, os conceitos fundamentais, os arranjos típicos de usinas com as estruturas civis associadas e a descrição das famílias de turbinas Francis, Kaplan e Pelton com seus sistemas auxiliares. Cada seção foi redigida com objetivos explícitos, linguagem consistente e imagens representativas, privilegiando clareza, navegabilidade e padronização do conteúdo (IEC/IEEE, 2019).

4 Resultados

Este capítulo apresenta os resultados do estudo, consolidando a estrutura e as regras de apresentação do guia técnico e demonstrando sua aplicação por meio do conteúdo integral do estudo de caso. As decisões de organização, formatação e usabilidade foram derivadas do referencial normativo analisado e dos critérios definidos na metodologia, com foco em clareza, padronização e controle de mudanças.

Na primeira parte, confirma-se a macroestrutura do documento, com títulos estáveis, hierarquia coerente e referências cruzadas funcionais, alinhadas à numeração progressiva. Em seguida, registra-se a especificação de formatação em conformidade às normas selecionadas. Por fim, apresenta-se o conteúdo técnico do estudo de caso, que gera a aplicação prática das diretrizes e valida a estrutura proposta como base replicável para futuros manuais.

4.1 Macroestrutura confirmada do manual

A organização final do manual, validada no estudo, estrutura-se nos seguintes componentes:

1. **Introdução**: apresenta o objetivo do documento, o público-alvo e orientações de uso.
2. **Conceitos Fundamentais**: consolida a base técnica necessária ao nivelamento e melhor compreensão prática do conteúdo de trabalho.
3. **Usinas Hidrelétricas**: descreve a classificação por porte e por arranjo, destacando implicações operativas e civis pertinentes ao contexto brasileiro.
4. **Turbinas e Sistemas Auxiliares (SAT)**: reúne as famílias Francis, Kaplan e Pelton e seus sistemas associados, como regulação, vedações e drenagem, enfatizando critérios de aplicação conforme queda e vazão.
5. **Geradores e Reguladores de velocidade e tensão**: aborda os geradores síncronos, critérios de especificação e operação, sistemas de excitação e os reguladores de velocidade e de tensão.

Essa organização permite uma sequência didática na leitura e garante a consulta pontual por assunto, com títulos, referências cruzadas e níveis hierárquicos compatíveis com o padrão de numeração progressiva recomendado pela NBR 6024 (ABNT, 2012).

4.1.1 Especificação de formatação do manual

Com base nas diretrizes consolidadas na Metodologia, a formatação a ser adotada no manual técnico é a seguinte, limitada ao que foi normatizado e acordado:

- **Estrutura do documento**: elementos pré-textuais, textuais e pós-textuais conforme as normas de apresentação. Títulos de seções numerados progressivamente até o quinto nível, com indicativos em algarismos arábicos (ex.: 3, 3.1, 3.1.1) e título imediatamente após o número, alinhado à margem esquerda.
- **Sumário e listas**: Os indicativos numéricos permanecem alinhados à esquerda e a paginação à direita. A palavra "Sumário" é centralizada.
- **Páginas e paginação**: elementos pré-textuais são contados, porém não numerados, a numeração em algarismos arábicos inicia-se na primeira página textual e segue até os pós-textuais, em ordem contínua.
- **Margens e espaçamento**: espaçamento simples no corpo do texto. Margens para anverso: esquerda e superior de 3 cm, direita e inferior de 2 cm; para verso: direita e superior de 3 cm, esquerda e inferior de 2 cm.
- **Alinhamento e parágrafos**: texto justificado; recuo de primeira linha de 1,3 cm, espaço entre parágrafos de 0,2 cm (sem linhas em branco), conforme adotado no projeto.
- **Fonte e tamanhos**: corpo 12 no texto principal. Tamanho reduzido e padronizado para citações, notas de rodapé, paginação, legendas e fontes de figuras e tabelas.
- **Citações no texto**: citações diretas de até três linhas no corpo do parágrafo, entre aspas duplas. Com mais de três linhas, recuo de 4 cm à esquerda, espaço simples, sem aspas e com fonte reduzida.
- **Referências**: Apresentada ao final, alinhada à margem esquerda, em espaço simples e separadas entre si por um espaço simples.
- **Figuras, quadros e tabelas**: identificação na parte superior, precedida da palavra designativa, do número de ordem no texto, travessão e título. Indicação de Fonte logo abaixo do elemento e sua numeração é sequencial.
- **Fórmulas e equações**: destacadas no texto e, quando necessário, numeradas com algarismos arábicos entre parênteses, alinhadas à direita.
- **Siglas e abreviaturas**: na primeira ocorrência, apresentar o nome por extenso seguido da sigla entre parênteses. As ocorrências seguintes podem adotar apenas a sigla.

4.2 Panorama da hidrogeração

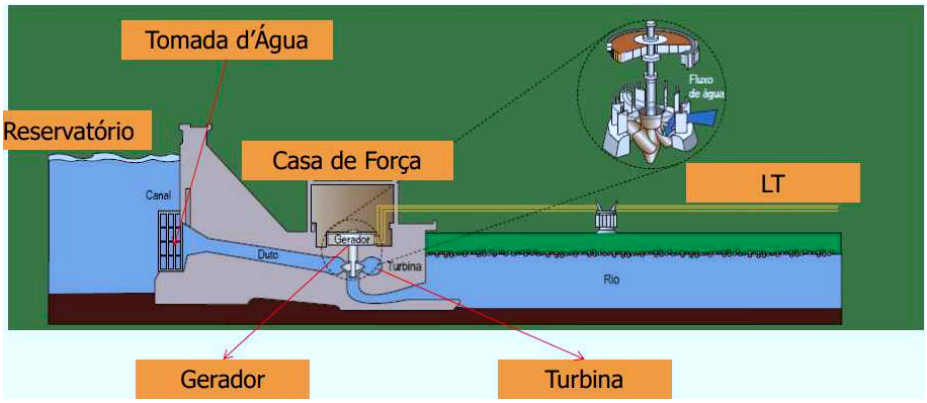
A geração de energia por usinas hidrelétricas, a hidrogeração, parte de uma ideia simples, usar a diferença de nível da água para acionar uma turbina e produzir eletricidade. Para que isso aconteça de forma eficiente e segura, três elementos são decisivos: a queda disponível, a vazão que chega à máquina e a eficiência com que a instalação transforma

essa energia em potência elétrica. Entre a tomada d'água e o gerador, a água percorre um longo caminho, passando por condutos e dispositivos de controle. Neles, perdas hidráulicas, cavitação e transitórios podem reduzir desempenho ou impor riscos, exigindo previsão e controle.

Assim, visando garantir um bom desempenho das usinas de hidrogeração, é fundamental que o profissional da área possua um bom entendimento a respeito das noções centrais que regem este tipo de projeto. Junto a isso, é importante também compreender não apenas o resultado final do processo, que é a geração de energia elétrica, mas também todo o macro que o envolve, como os conceitos prévios de estudo, as principais estruturas da construção civil e os tipos de turbina que melhor se adaptam a cada aplicação. Todos esses conceitos devem ser avaliados e estudados em conjunto, de modo a permitir o melhor desempenho do projeto.d

Um exemplo de disposição dos principais componentes pode ser visto na Figura 2 a seguir.

Figura 2 – Esquema geral de uma usina hidrelétrica.



Fonte: (Usinas Hidrelétricas - Furnas Centrais Elétricas., s.d).

4.2.1 Histórico e evolução da hidroeletricidade

O aproveitamento energético da água antecede a eletrificação em larga escala. Por séculos, rodas d'água e moinhos converteram energia hidráulica em trabalho mecânico, até que, no fim do século XIX, a conversão de hidráulica para elétrica passou a ser realizada em centrais hidrelétricas.

Ao longo do século XX e início do XXI, avanços em materiais, métodos de fabricação, instrumentação, hidráulica experimental e, mais recentemente, Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, *Computational Fluid Dynamics*) e controle digital, ampliaram a operação eficiente perto e fora do Ponto de Melhor Eficiência (BEP, *Best Efficiency Point*).

No plano internacional, a hidroeletricidade segue pilar da geração renovável. Em 2023, a *International Energy Agency* (IEA) registrou que, embora a potência instalada

fotovoltaica já tenha superado a hidrelétrica, a hidro permaneceu como a maior fonte de geração renovável do planeta, respondendo por cerca de 47% da produção renovável global naquele ano (IEA, 2024). Tal protagonismo decorre de atributos como baixo custo marginal de operação, elevada vida útil dos ativos e capacidade de regulação e *ramping*, variação controlada da potência gerada ao longo do tempo (notadamente via PSH).

No Brasil, a hidrogeração estruturou a expansão do parque gerador e a formação do SIN ao longo do século XX. Em 2025, as usinas hidrelétricas somam cerca de 108 GW de capacidade instalada, representando aproximadamente 44% da capacidade do SIN, segundo o ONS (ONS, 2025). Em termos de oferta e balanço energético, o Balanço Energético Nacional de 2025 da EPE reforça a relevância da fonte hidráulica na matriz elétrica, ainda que com dinâmica recente de diversificação por outras renováveis e por condicionantes hidrológicos (EPE, 2025a).

4.2.2 Cadeia de conversão de energia

A conversão de energia em um aproveitamento hidrelétrico pode ser descrita como uma sequência integrada de transformações. A energia potencial gravitacional do volume d'água é convertida em energia cinética no circuito hidráulico de adução, que por sua vez se transforma em energia mecânica no eixo da turbina e, finalmente, em energia elétrica no gerador. Na escala do sistema, o objetivo de projeto e operação é maximizar a potência e a energia úteis entregues à rede, reduzindo perdas hidráulicas, mecânicas e elétricas ao longo do trajeto (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2025).

No trecho de adução (tomada d'água, conduto forçado e acessórios), a energia potencial associada ao desnível entre montante e jusante é parcialmente convertida em energia cinética do escoamento e sofre perdas inevitáveis por atrito e singularidades. Essas perdas são usualmente expressas em metros de coluna d'água e dependem de parâmetros como comprimento e rugosidade dos condutos e das singularidades do traçado. Sua minimização orienta o dimensionamento e a escolha de transições hidráulicas adequadas (CENGEL; CIMBALA, 2018).

Na turbina, a transformação de energia do escoamento em torque de eixo depende da família adotada, Francis, Kaplan ou Pelton, e do ponto de operação. Em máquinas de reação, ou seja, Francis ou Kaplan, parte da conversão de pressão ocorre no interior do conjunto, e o tubo de sucção recupera a energia cinética remanescente, contribuindo decisivamente para o rendimento global. Em máquinas de ação, Pelton, a queda de pressão é convertida em jato livre antes do rotor. Em qualquer caso, operar próximo ao ponto de melhor eficiência e manter escoamento bem condicionado na entrada e saída são fatores-chave para minimizar perdas e riscos de cavitação (DIXON; HALL, 2014).

Por fim, o gerador síncrono converte a potência mecânica em potência elétrica,

enquanto o controle de excitação e o regulador de velocidade permitem atender às exigências do sistema elétrico, principalmente fator de potência, regulação de tensão e resposta primária de frequência. Portanto, na prática, o desempenho global resulta da combinação dos rendimentos hidráulico, mecânico e elétrico.

4.3 Conceitos Fundamentais

4.3.1 Potência hidráulica

A potência elétrica útil de uma unidade hidrelétrica é estimada por

$$P_{\mathrm{el}} \;=\; \rho\, g\, Q\, H_{\mathrm{L}}\, \eta_{\mathrm{global}}, \tag{4.1}$$

relação clássica que expressa a conversão da vazão que atravessa a turbina, sob uma certa queda efetiva, em potência elétrica após as perdas agregadas do sistema (CENGEL; CIMBALA, 2018).

Definições e unidades:

P_{el}	potência elétrica útil nos terminais do gerador (W).
ρ	massa específica da água (kg/m^3); adota-se 1000.
g	aceleração da gravidade (m/s^2); adota-se 9,81.
Q	vazão volumétrica que atravessa a turbina (m^3/s).
H_{L}	queda líquida efetiva na máquina (m).
η_{global}	rendimento global do conjunto (adimensional).

Forma equivalente frequentemente utilizada:

$$P_{\mathrm{el}} \;=\; \gamma\, Q\, H_{\mathrm{L}}\, \eta_{\mathrm{global}}, \tag{4.2}$$

com γ representando o peso específico da água, tipicamente $\gamma \approx 9810$ N/m^3 (CENGEL; CIMBALA, 2018).

4.3.2 Quedas

Em estudos e projeto de usinas, um tópico de suma importância é a distinção que se dá entre a queda bruta (H_{B}), as perdas de carga (h_{perdas}) e a queda líquida (H_{L}), a qual é a altura efetivamente disponível na turbina e se dá pelo cálculo a seguir:

$$H_{\mathrm{L}} \;=\; H_{\mathrm{B}} \;-\; h_{\mathrm{perdas}}. \tag{4.3}$$

4.3.2.1 Queda bruta

Em instalações com reservatórios a montante e a jusante, a queda bruta é, em primeira aproximação, a diferença de cotas entre os níveis d'água:

$$H_{\mathrm{B}} \;\approx\; z_{\mathrm{montante}} \;-\; z_{\mathrm{jusante}}. \tag{4.4}$$

Para avaliações precisas, como em ensaios de desempenho e aceitação, a queda é definida como o desnível de energia entre seções de medição a montante e a jusante, incluindo termos de pressão e velocidade e respeitando posições e critérios de estabilização de escoamento estabelecidos em norma (IEC, 1991).

4.3.2.2 Perdas de carga (h_{perdas})

As perdas totalizam contribuições distribuídas, representadas por h_f e atribuídas ao atrito contínuo ao longo dos condutos, e contribuições localizadas, representadas por h_m e associadas a singularidades como entradas, grades, curvas, válvulas e difusores:

$$h_{\mathrm{perdas}} \;=\; h_f \;+\; h_m. \tag{4.5}$$

Em operação, alterações no estado de limpeza de grades, na posição de válvulas e na rugosidade interna, incrustações e depósitos, são suficientes para modificarem essas variáveis e elevar h_{perdas} para a mesma vazão. Por isso, medições periódicas e manutenção de superfícies internas e acessórios são essenciais para preservar a queda disponível.

4.3.2.3 Queda líquida

A queda líquida é a grandeza que efetivamente entra no cálculo da potência. Como h_{perdas} cresce aproximadamente com Q^2 em condutos de seção fixa, o aumento de vazão tende a reduzir a fração da queda total que chega ao rotor. Além disso, a elevação do nível de jusante em regimes de maior descarga diminui H_{B}, comprimindo ainda mais H_{L}. Em termos práticos, isso reforça a importância de projetar os traçados de adução com transições suaves e dimensões adequadas, de forma a minimizar as perdas hidráulicas.

4.3.3 Rendimento global

O rendimento global de uma unidade hidrelétrica é definido como a razão entre a potência elétrica útil entregue e a potência hidráulica disponível no rotor. No arranjo clássico, ele é decomposto no produto dos rendimentos hidráulico, mecânico e elétrico:

$$\eta_{\mathrm{global}} \;=\; \frac{P_{\mathrm{el}}}{\rho\, g\, Q\, H_{\mathrm{L}}} \;=\; \eta_{\mathrm{hid}} \cdot \eta_{\mathrm{mec}} \cdot \eta_{\mathrm{el}}. \tag{4.6}$$

Essa decomposição é útil tanto para análise de desempenho quanto para balanços de perdas ao longo da cadeia de conversão (DIXON; HALL, 2014).

4.3.3.1 Rendimento hidráulico da turbina (η_{hid})

O rendimento hidráulico relaciona a potência de eixo fornecida pela turbina com a potência hidráulica disponível:

$$\eta_{\text{hid}} = \frac{P_{\text{eixo,turb}}}{\rho\, g\, Q\, H_{\text{L}}}. \tag{4.7}$$

Fisicamente, decorre da conversão de energia do escoamento em torque de eixo, governada pela equação de Euler para turbomáquina. Perdas de incidência, atrito interno, recirculações, desempenho do tubo de sucção e eventual cavitação reduzem η_{hid} fora do ponto de melhor eficiência (DIXON; HALL, 2014).

4.3.3.2 Rendimento mecânico (η_{mec})

O rendimento mecânico traduz as perdas entre a turbina e o gerador associadas a mancais, vedações, acoplamentos e ventilação/arrasto do conjunto girante. Fatores como desalinhamento, condições de lubrificação e operação fora das faixas recomendadas tendem a reduzir η_{mec} (DIXON; HALL, 2014).

4.3.3.3 Rendimento elétrico do gerador (η_{el})

O rendimento elétrico é definido por

$$\eta_{\text{el}} = \frac{P_{\text{el}}}{P_{\text{eixo,ger}}}, \tag{4.8}$$

e é afetado por perdas em cobre, perdas no ferro, por histerese e correntes parasitas, perdas adicionais de carga, ventilação/refrigeração e no excitador. A determinação padronizada do rendimento e das perdas do gerador em ensaio segue a IEC 60034-2-1 (IEC, 2014).

4.3.3.4 Implicações práticas

A Eq. (4.6) orienta o diagnóstico de desempenho, ganhos de energia passam por melhorar o condicionamento do escoamento na turbina, elevando η_{hid}, manter o trem mecânico em condições ótimas,elevando η_{mec}, e otimizar o gerador e seu sistema de excitação, elevando η_{el}. Em testes de campo e de aceitação, a determinação de rendimentos e a apuração das incertezas seguem procedimentos normativos para grupos turbina–gerador, notadamente a IEC 60041 no que tange à parte hidráulica (IEC, 1991).

4.3.4 Cavitação

A cavitação ocorre quando a pressão estática local do escoamento cai abaixo da pressão de vapor do líquido, formando cavidades que colapsam e geram microjatos e ondas de choque capazes de provocar erosão, ruído e vibração (BRENNEN, 1995). A

suscetibilidade é frequentemente expressa pelo índice de Thoma, na forma simplificada:

$$\sigma \;=\; \frac{p_{\mathrm{ref}} - p_v}{\rho\, g\, H_{\mathrm{L}}}\,, \tag{4.9}$$

em que p_{ref} é a pressão absoluta na seção de referência (consistente com a definição empregada no ensaio), p_v é a pressão de vapor, ρ é a massa específica do fluido, g é a aceleração da gravidade e H_{L} é a queda líquida. Em projeto e verificação, compara-se σ ao valor crítico da máquina (σ_{crit}), função do tipo de turbina e da rotação específica. Há risco quando $\sigma < \sigma_{\mathrm{crit}}$ (IEC, 1999).

4.3.4.1 Formas típicas e regiões críticas

Em turbinas Francis, são comuns cavidades na borda de fuga das pás, vórtices de ponta e fenômenos associados ao tubo de sucção. Em turbinas Kaplan, observam-se cavidades em bordos de ataque/fuga, vórtices de ponta e efeitos no tubo de sucção. Em turbinas Pelton, a cavitação concentra-se no divisor das conchas e, em certas condições, no bocal e na agulha (FRANC; MICHEL, 2004).

4.3.4.2 Prevenção e mitigação

As principais medidas incluem garantir submergência adequada do tubo de sucção, otimizar perfis e ângulos das pás, condicionar o escoamento de entrada, controlar o ponto de operação para evitar faixas desfavoráveis e, quando aplicável, empregar polimento superficial, revestimentos resistentes e técnicas de supressão, por exemplo, admissão de ar no tubo de sucção (DIXON; HALL, 2014).

4.3.4.3 Impactos operacionais e de integridade

O colapso repetido de cavidades causa a formação de pequenas cavidades e remoção progressiva de material nas superfícies hidráulicas, aumentando a rugosidade, deslocando o ponto de melhor eficiência e reduzindo o rendimento hidráulico. Em paralelo, ruído e vibração podem elevar esforços dinâmicos, antecipar fadiga, aumentar a frequência de paradas para manutenção e, em casos severos, impor restrições de carga e disponibilidade da unidade (BRENNEN, 1995).

Figura 3 – Exemplos de danos causados por cavitação em componentes hidráulicos.



Fonte: (Indeba, 2025).

4.3.5 Golpe de aríete

O golpe de aríete é o transitório hidráulico gerado por variações rápidas de velocidade em condutos forçados, típicas de manobras de abertura e fechamento de órgãos de passagem, rejeição de carga ou partidas e paradas. A perturbação de pressão se propaga ao longo do sistema com a celeridade a, podendo produzir sobrepressões e depressões significativas, com implicações estruturais e operativas para condutos, chaminés de equilíbrio e unidades geradoras (CHAUDHRY, 2014).

Para uma variação brusca de velocidade, golpe rápido, a relação de Joukowsky dá a amplitude de pressão:

$$\Delta p \;=\; \pm\,\rho\,a\,\Delta v, \tag{4.10}$$

sendo positiva para redução súbita de vazão, sobrepressão, e negativa para aceleração súbita, depressão (CHAUDHRY, 2014).

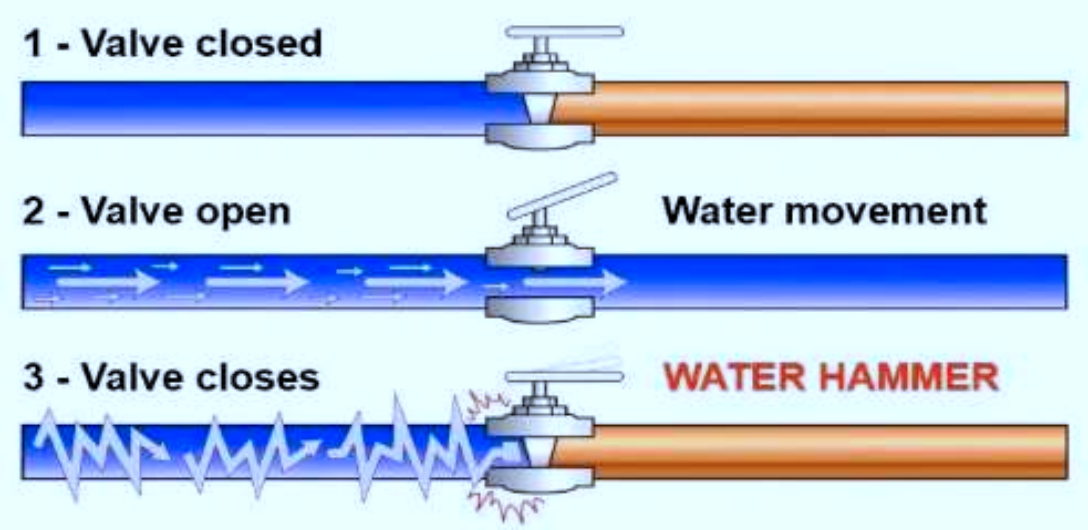
4.3.5.1 Aplicação prática

Em usinas com turbinas Francis e Kaplan, o fechamento das palhetas-guia durante rejeições de carga altera rapidamente a velocidade no conduto, gerando a primeira crista, ou vale, de pressão conforme a Eq. (4.10). Em unidades Pelton, o desvio súbito do jato pelo defletor durante rejeição de carga produz variação de momento e de vazão efetiva no bocal, igualmente iniciando ondas de pressão. Válvulas de guarda a montante e dispositivos de bloqueio em adutoras longas são outras fontes usuais de transitórios severos (WYLIE; STREETER; SUO, 1993). O objetivo é manter as pressões máximas e mínimas dentro dos limites do projeto mecânico do conduto e preservar a margem contra cavitação no tubo de sucção e na região de saída da turbina.

4.3.5.2 Integração com a operação da unidade

Os transitórios alteram temporariamente a queda líquida H_{L} e a margem de cavitação, influenciando vibração, esforços em apoios e a resposta eletromecânica na rejeição de carga. Por isso, curvas de manobra e rotinas de aceitação devem ser verificadas com simulações transitórias para os cenários críticos do arranjo, assegurando conformidade com pressões admissíveis e com a operação segura da usina (CHAUDHRY, 2014).

Figura 4 – Esquema ilustrativo do golpe de aríete.



Fonte: (ModoPump, 2022).

4.3.6 Chaminé de equilíbrio

A chaminé de equilíbrio é um reservatório vertical conectado ao circuito de adução, geralmente ao conduto forçado, que atua como um "pulmão" hidráulico. Em manobras rápidas, ela fornece ou absorve volume de água, reduzindo sobrepressões e subpressões e estabilizando a carga na entrada da turbina. Em aproveitamentos com adutoras longas e grande inércia do escoamento, sua presença é decisiva para limitar amplitudes do golpe de aríete e melhorar o comportamento transitório da unidade (CHAUDHRY, 2014).

4.3.6.1 Integração com golpe de aríete e operação

Durante manobras, como partida, rejeição de carga ou fechamento de válvulas, a chaminé realoca rapidamente volume entre o túnel e a atmosfera, reduzindo os picos de sobrepressão ou subpressão previstos pela relação de Joukowsky e estabilizando H_{L} na entrada da turbina. Isso melhora a margem contra cavitação em regime transitório e reduz esforços mecânicos em condutos, juntas e acessórios. O monitoramento do nível na chaminé é útil para validar modelos e ajustar leis de manobra (CHAUDHRY, 2014).

4.4 Usinas Hidrelétricas

Usina hidrelétrica é a instalação que, explorando um desnível hidráulico, queda, e uma vazão, converte a energia da água em eletricidade por meio de um arranjo integrado de obras civis e sistemas eletromecânicos. Diversas estruturas compõem esse arranjo com diferentes propósitos, indo desde a regulação de níveis e escoamentos e condução do fluxo até realizar a conversão de energia. A seleção de cada solução resulta da combinação entre hidrologia e topografia do local, condições geológicas, requisitos ambientais e de navegação, demanda local e características do sistema elétrico, de modo a maximizar energia firme, flexibilidade operativa e segurança hidráulica e estrutural (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2025).

4.4.1 Classificação por porte

No Brasil, a divisão por porte é normativa e pautada na potência instalada. A ANEEL estabelece as categorias CGH, PCH e UHE, que orientam tanto o enquadramento técnico quanto o rito de outorga (ANEEL, 2020). Estas são divididas como demonstrado a seguir:

- CGH: potência instalada igual ou inferior a 5.000 kW.
- PCH: potência instalada superior a 5.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW.
- UHE: potência instalada superior a 30.000 kW.

Para fins de outorga, aproveitamentos até 50 MW, inclusive UHEs entre 30 e 50 MW, seguem autorização, enquanto acima de 50 MW estão sujeitos à concessão. Historicamente, o critério de área do reservatório (13 km^2) deixou de integrar o enquadramento de PCH a partir de 2023 (ANEEL, 2023).

4.4.2 Classificação por arranjo

Funcionalmente, os aproveitamentos hidrelétricos agrupam-se conforme a forma de armazenamento e operação: fio d'água, com reservatório de regularização e reversível por bombeamento (PSH). Essa taxonomia relaciona-se diretamente à possibilidade de deslocar geração no tempo e aos serviços que cada arranjo pode prestar ao sistema (IEA, 2021).

- Fio d'água — opera com volumes úteis pequenos voltados ao alisamento de curto prazo, de modo que a produção segue mais de perto o regime hidrológico (MME/EPE, 2007) (ver Figura 5).

Figura 5 – Arranjo fio d'água.



Fonte: (Pensamento Verde, s.d.).

- Com reservatório de regularização — armazena água em escala sazonal ou plurianual, permitindo deslocar geração e ampliar a flexibilidade operativa (IEA, 2021) (ver Figura 6).

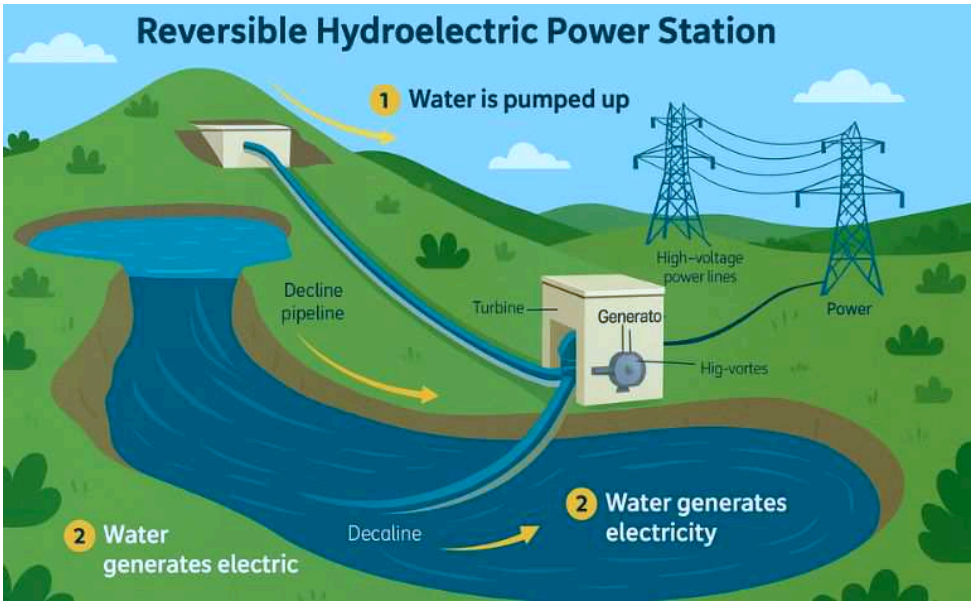
Figura 6 – Arranjo com reservatório de regularização.



Fonte: (ANA, s.d.).

- Reversível por bombeamento (PSH) — utiliza dois reservatórios em cotas distintas para armazenar energia por bombeamento e gerar por turbinamento (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2024) (ver Figura 7).

Figura 7 – Arranjo reversível por bombeamento (PSH).

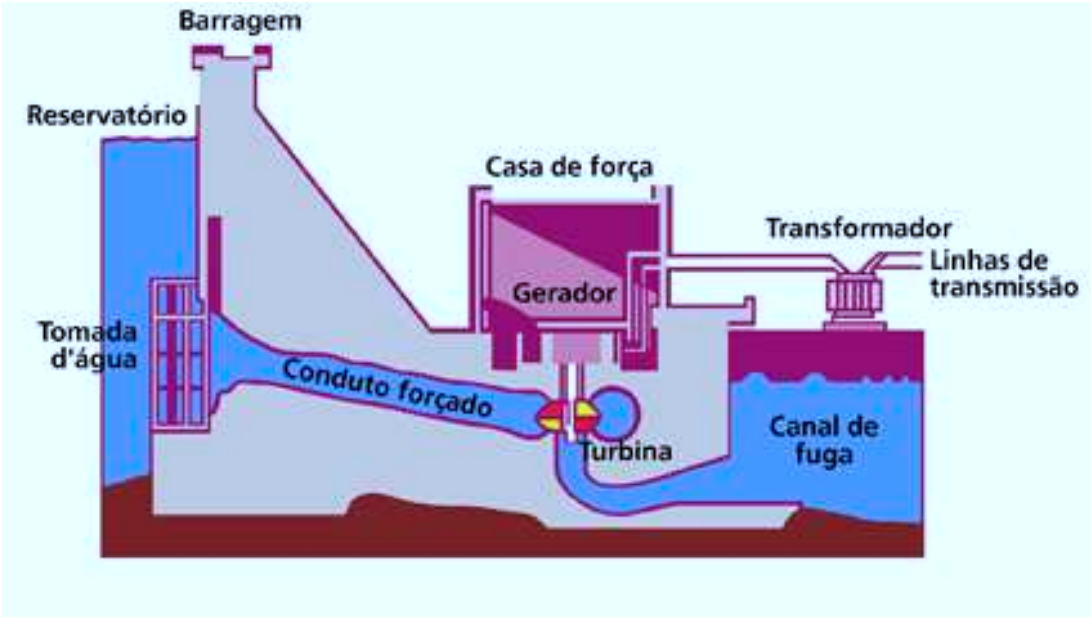


Fonte: (Solar dos Pomares, s.d.).

4.4.3 Estruturas civis principais

As estruturas civis materializam o desnível hidráulico, conduzem as vazões de forma controlada e garantem a passagem segura das cheias. Seu dimensionamento condiciona diretamente o desempenho energético, a integridade estrutural e a segurança de barragens e operações associadas. A Figura 8 ilustra, de forma esquemática, os principais elementos.

Figura 8 – Esquema geral de uma usina hidrelétrica.



Fonte: (ABRAPCH, s.d.).

4.4.3.1 Barragem

A barragem cria o desnível hidráulico e, quando aplicável, proporciona armazenamento útil para regularização (U.S. BUREAU OF RECLAMATION, 1987). O desempenho hidráulico envolve integração com descarregadores, vertedouros ou descargas de fundo, evitando sobre-elevação não prevista do nível d'água e garantindo margens de segurança nas cheias de projeto (NOVAK et al., 2010).

4.4.3.2 Tomada d'água e grades

A tomada d'água controla a admissão às unidades, estabiliza o escoamento e protege os conjuntos turbina-gerador contra detritos. A geometria do poço e do canal de aproximação é concebida para reduzir assimetrias e suprimir vórtices de superfície ou de fundo, mitigando riscos de cavitação e perda de carga adicional (NOVAK et al., 2010). As grades são dimensionadas pelo espaçamento entre barras e pela velocidade de aproximação, limitando o arraste de sólidos e facilitando a limpeza manual ou mecânica. Comportas planas ou radial, dotadas de sistemas de içamento e vedação, permitem isolar a tomada para manutenção e contingências (U.S. BUREAU OF RECLAMATION, 1987).

4.4.3.3 Condutos forçados

Os condutos forçados transferem a água pressurizada até a turbina, e seu diâmetro influencia perdas e potência disponível. A integridade estrutural é definida por espessura, classe do aço, soldas, ancoragens e sapatas, considerando pressões internas, cargas externas e esforços de frenagem (ASCE, 2012). Transitórios hidráulicos, golpe de aríete, por exemplo, decorrentes de manobras e rejeições de carga são tratados por análise de ondas e mitigados por chaminés de equilíbrio, válvulas de ar, by-passes e leis de manobra (CHAUDHRY, 2014).

4.4.3.4 Vertedouros

O vertedouro é a principal estrutura de segurança para a passagem de cheias, devendo descarregar a vazão de projeto com controle do nível montante e da lâmina vertente. As tipologias usuais incluem soleira livre, perfil ogiva, e arranjos com comportas, como segmento, vagão ou setor, além de calhas e túneis de desvio adaptados para operação permanente (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1990). A dissipação de energia a jusante é dimensionada por bacias de dissipação com ressalto hidráulico quando há leito molhado, ou por defletores quando se busca lançamento em queda livre (PETERKA, 1984).

4.4.3.5 Vazão sanitária

A vazão sanitária garante funções ecológicas e condições sanitárias mínimas no trecho a jusante, assegurando a conectividade hidrológica e habitat aquático. A determinação do regime ecológico utiliza métodos hidrológicos, hidráulico-habitat e abordagens holísticas, calibrados ao contexto local e às metas ambientais (THARME, 2003). A liberação pode ocorrer por descargas de fundo, by-pass ecológico dedicado, microturbinas ou sangrias na tomada, com medição e registro para comprovação de conformidade (ACREMAN; DUNBAR, 2004). O posicionamento da descarga e a qualidade da água, variáveis como a temperatura e oxigênio, devem evitar quaisquer impactos negativos a jusante.

4.4.3.6 Casa de força e circuito de fuga

A casa de força abriga o conjunto eletromecânico e o poço hidráulico, podendo ser de superfície, abrigada ou subterrânea conforme geologia e critérios ambientais. Em turbinas de reação, o tubo de sucção recupera parte da energia cinética na saída do rotor e condiciona a elevação de instalação por cavitação, demandando difusores com expansão controlada e ausência de separação. O canal, ou conduto, de fuga conduz a água ao corpo receptor com perdas mínimas e controle de velocidades, evitando erosão de margens e recirculação próxima à tomada (NOVAK et al., 2010).

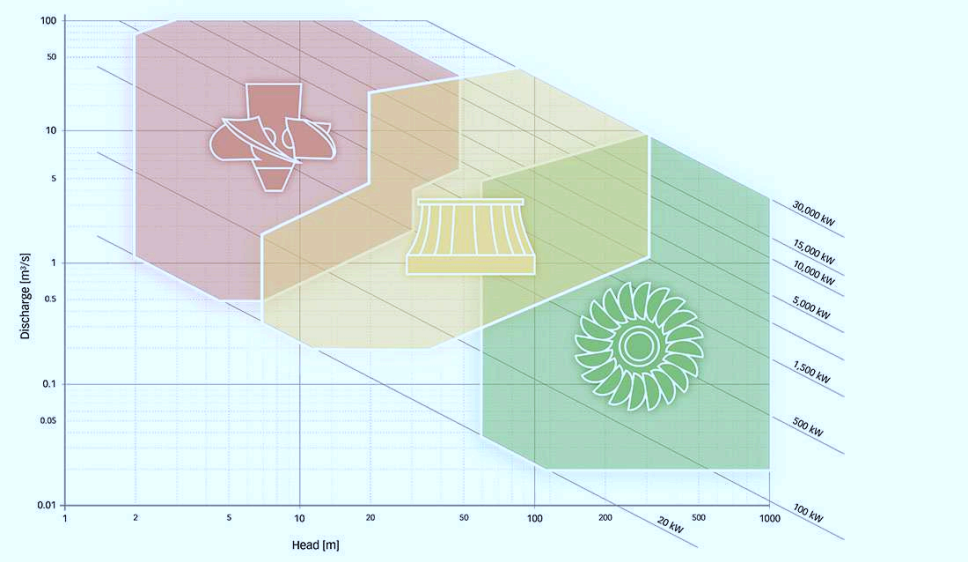
4.5 Turbinas Hidráulicas

As turbinas hidrelétricas convertem a energia potencial e cinética da água em potência mecânica no eixo por meio da troca de quantidade de movimento entre o escoamento e o rotor. Existem diferentes modelos projetados para contextos hidrológicos diversos, entre as variáveis de seleção, destacam-se a queda líquida H e a vazão Q, sintetizadas pela velocidade específica que organiza o domínio de aplicação: Pelton para altas quedas e baixas vazões, Francis para faixas intermediárias e Kaplan para baixas quedas e grandes vazões (MOSONYI, 1991).

4.5.1 Classificação geral, critérios de seleção e curvas características

As turbinas hidráulicas realizam a conversão de energia por troca de quantidade de movimento entre o escoamento e o rotor. Quanto ao princípio de transferência de energia, dividem-se em ação, ou impulso e reação, a Pelton representa a ação, enquanto Francis e Kaplan são de reação. O domínio de aplicação organiza-se principalmente pelos pares de queda líquida H e vazão Q, Pelton para quedas altas e vazões menores, Francis para faixas intermediárias e Kaplan para baixas quedas e grandes vazões (DIXON; HALL, 2014). A Figura 9 ilustra esses campos típicos.

Figura 9 – Campos de aplicação ($H \times Q$) para Pelton, Francis e Kaplan.



Fonte: (Hidroenergia, s.d.).

A seleção tipológica considera, além do par H–Q, a rotação específica (n_s ou n_q) e invariantes de projeto (como n_{11}, Q_{11}), bem como requisitos de regulação, integração civil, transitórios e custos no ciclo de vid. O encaminhamento final busca o melhor compromisso entre eficiência média sazonal, flexibilidade e risco de cavitação (MOSONYI, 1991).

4.5.2 Francis

Turbina de reação com escoamento misto, radial–axial, que ocupa a faixa intermediária entre Pelton e Kaplan, entregando elevados rendimentos para quedas de dezenas a poucas centenas de metros e vazões correspondentes (DIXON; HALL, 2014).

4.5.2.1 Conceito e arranjos construtivos

A Francis converte energia pela variação de momento em um rotor de pás fixas, enquanto a regulação de potência é feita no distribuidor, o que permite manter alto rendimento em uma ampla faixa de carga (DIXON; HALL, 2014).

O arranjo mais difundido é o de eixo vertical, aplicado em potências médias e grandes, com carcaça espiral de concreto ou metálica e tubo de sucção para recuperação de pressão (NOVAK et al., 2010). Em máquinas de menor porte, onde a simplicidade e o custo da obra civil são determinantes, utiliza-se a configuração de eixo horizontal, facilitando a montagem e a manutenção em casas de força menores (MOSONYI, 1991).

Figura 10 – Turbina Francis Horizontal Simples



Fonte: (WEG S.A., s.d.).

4.5.2.2 Critérios de seleção e integração

A seleção parte do par $H_{\text{líq}}, Q$ e da rotação específica, n_s ou n_q, que determinam diâmetro e rotação economicamente ótimos (MOSONYI, 1991). A posição de instalação é limitada pela cavitação, usualmente avaliada pelo coeficiente de Thoma (σ) e pelas exigências de submergência no tubo de sucção (FRANC; MICHEL, 2004). A integração civil deve reduzir perdas e assimetrias no escoamento e respeitar os transitórios hidráulicos, como o golpe de aríete, recorrendo a chaminé de equilíbrio e leis de manobra adequadas quando há adutoras longas (CHAUDHRY, 2014).

4.5.2.3 Curvas características, BEP e operação

O desempenho é representado por curvas de colina que relacionam rendimento, potência e queda às variáveis de controle. Em parte de carga, a incidência e as separações geram estruturas como vórtice de corda no difusor, elevando perdas, vibração e risco de cavitação. Desse modo, buscar operar próximo ao BEP e aplicar ventilação controlada são medidas de mitigação usuais (FRANC; MICHEL, 2004).

4.5.2.4 Componentes e funções

A carcaça espiral recebe a vazão da adutora e a distribui circunferencialmente de forma quase uniforme ao redor do conjunto fixo. Para manter velocidades próximas e evitar assimetrias de pressão, sua seção transversal decresce no sentido do escoamento, compatibilizando a área com a vazão ainda não derivada para os canais seguintes (NOVAK et al., 2010).

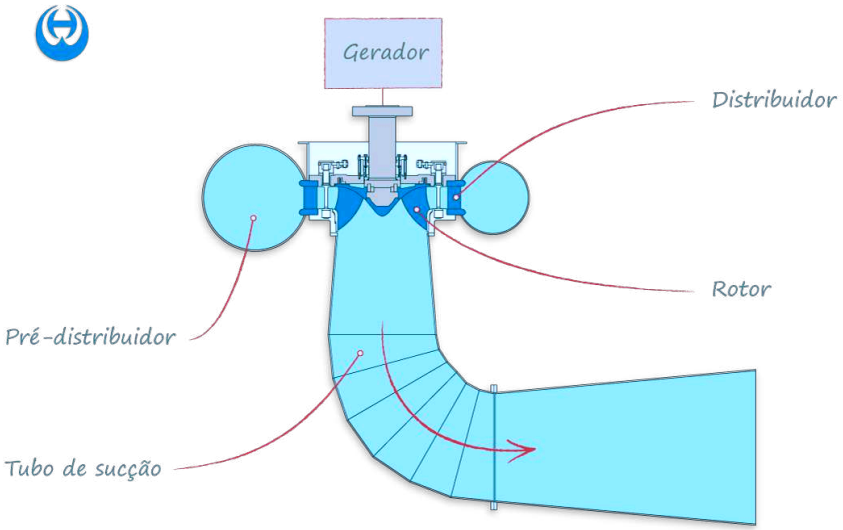
O pré-distribuidor é um anel de pás fixas radiais que endireita e condiciona o escoamento vindo da carcaça, reduzindo componentes indesejadas de rotação antes do distribuidor móvel. Estruturalmente, conecta a carcaça ao anel do distribuidor e à tampa, ou anel, da turbina, transmitindo esforços e conferindo rigidez ao conjunto, além de organizar os canais de passagem (NOVAK et al., 2010).

O distribuidor forma um anel de pás móveis comandadas por servomotores via anel de regulação. Sua função é modular a vazão admitida e ajustar o ângulo de incidência no rotor, garantindo operação próxima ao ponto de melhor eficiência em diferentes quedas e cargas (DIXON; HALL, 2014).

O rotor realiza a conversão de energia ao desviar e desacelerar o escoamento em regime de reação mista. A geometria das pás é definida para compatibilizar incidência, evitar separações e limitar perdas e esforços dinâmicos, com anéis de desgaste e vedações em labirinto nas folgas para reduzir recirculações e vazamentos internos (DIXON; HALL, 2014).

O tubo de sucção atua como difusor de grande área para recuperar parte da energia cinética na saída do rotor e elevar a pressão estática até o canal de fuga. Seu desempenho depende da difusão sem separação, expansão suave, transições e curvas com boa guia de escoamento. Limitações de cavitação e o vórtice de corda em parte de carga exigem submergência adequada, arejamento e geometria otimizada para estabilidade e baixas perdas (FRANC; MICHEL, 2004).

Figura 11 – Esquema construtivo de turbina Francis vertical.



Fonte: (Hydrowheel$_{F}$*rancis*, s.d.).

4.5.3 Kaplan

Turbina de reação com escoamento axial destinada a baixas quedas e grandes vazões. Seu traço distintivo é a dupla regulação, combinando distribuidor, pás-guia, com variação do passo das pás do rotor para manter alto rendimento numa ampla faixa operativa (DIXON; HALL, 2014).

4.5.3.1 Conceito e arranjos

A conversão de energia ocorre em um rotor de pás reguláveis, enquanto o distribuidor modula a vazão e o ângulo de incidência, formando o conjunto de controle coordenado (DIXON; HALL, 2014). O arranjo com eixo vertical é predominante em potências médias e grandes, com duto de entrada e tubo de sucção de grande seção para recuperação de pressão. Para quedas muito baixas e escoamentos elevados, utilizam-se configurações horizontais ou do tipo bulbo, que compactam a obra civil e reduzem perdas na aproximação (MOSONYI, 1991). A hélice de pás fixas oferece banda estreita de alta eficiência, ao passo que a Kaplan, com passo variável, estende essa banda ao casar o ângulo das pás com a abertura do distribuidor.

Figura 12 – Turbina Kaplan S Jusante.



Fonte: (WEG S.A., s.d.).

4.5.3.2 Seleção e integração

A escolha parte do par $H_{\text{líq}}, Q$ e de uma rotação específica elevada, que define o compromisso entre diâmetro do rotor, velocidade e perdas hidráulicas da linha de água (MOSONYI, 1991). A lei de casamento entre distribuidor e passo de pá é estabelecida em ensaios de modelo e embute correções para diferentes quedas e rotações (IEC, 1999).

A instalação é condicionada por submergência adequada e por um tubo de sucção com difusão eficiente, sob pena de cavitação e instabilidades de escoamento (FRANC; MICHEL, 2004).

4.5.3.3 Curvas, BEP e operação

O comportamento é descrito por superfícies de rendimento $\eta(Q, H, n)$ que incorporam comandos combinados de distribuidor e passo, identificando o ponto de melhor eficiência (BEP) e as faixas de operação segura (DIXON; HALL, 2014). A determinação das curvas contratuais e da lei de casamento é feita em modelo reduzido conforme IEC 60193 (IEC, 1999).

4.5.3.4 Componentes

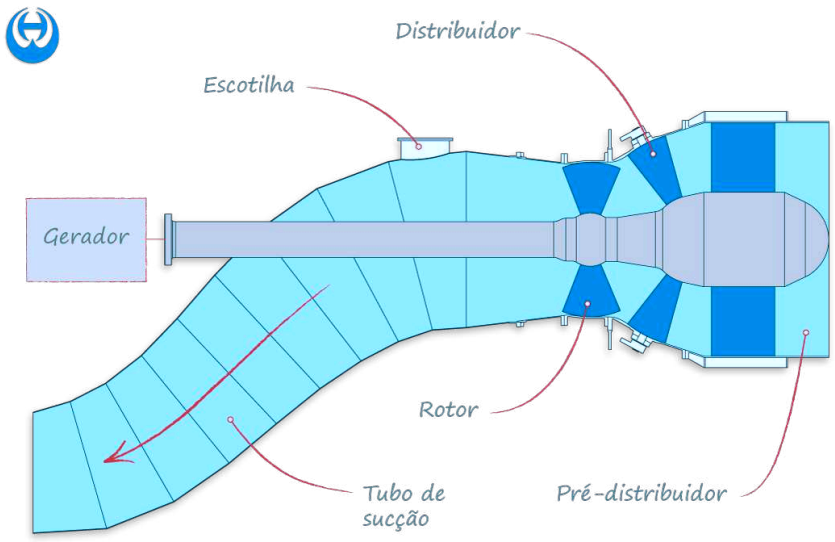
O duto de entrada recebe a vazão da adutora e a distribui de forma quase uniforme ao redor do conjunto fixo. Sua seção transversal decresce no sentido do escoamento para compatibilizar a área de passagem com a fração de vazão ainda não derivada. Imediatamente a jusante situam-se as aletas de estadia, pré-distribuidor, que endireitam e condicionam o escoamento e conectam estruturalmente o duto ao anel do distribuidor, conferindo rigidez ao conjunto e definindo os canais de passagem (NOVAK et al., 2010).

O distribuidor é um anel de pás móveis que modula a vazão admitida e ajusta o ângulo de incidência no rotor. As pás são acionadas por servomotores via anel de regulação, com mancais e vedações apropriadas. O correto casamento entre abertura do distribuidor e passo das pás do rotor é o que permite manter alto rendimento numa ampla faixa de operação (DIXON; HALL, 2014).

O rotor Kaplan possui pás de passo regulável montadas em mancais dentro do cubo do rotor (*hub*). O mecanismo de passo é, em geral, um servomotor hidráulico instalado no cubo, cujo movimento é transmitido às pás por eixos de manivelas e bielas, o óleo sob pressão chega ao cubo por eixo oco e junta rotativa. Os reguladores comandam, de forma coordenada, o posicionamento do distribuidor e do passo, garantindo a “lei de casamento” entre ambos ao longo das diferentes quedas e cargas (DIXON; HALL, 2014).

O tubo de sucção, difusor de grande seção, recupera parte da energia cinética na saída do rotor, elevando a pressão até o canal de fuga. O desempenho depende de difusão sem separação, transições suaves, curvas bem guiadas, e de submergência suficiente para evitar cavitação. Quando necessário, aplicam-se medidas para mitigar o vórtice central e oscilações de baixa frequência (FRANC; MICHEL, 2004).

Figura 13 – Esquema construtivo de turbina Kaplan de jusante.



Fonte: (Hydrowheel$_K aplan$, s.d.).

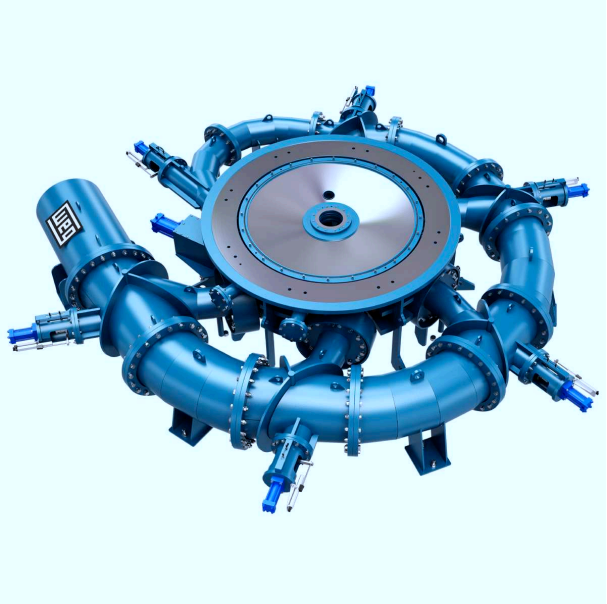
4.5.4 Pelton

Representante do grupo da turbina de ação, nele a queda é convertida em velocidade antes do rotor, e a troca de quantidade de movimento se dá pela deflexão do jato nas conchas com divisor central (DIXON; HALL, 2014). Aplica-se a altas quedas e baixas vazões, onde a linha de água e a obra civil privilegiam grandes energias específicas (MOSONYI, 1991).

4.5.4.1 Conceito e arranjos

Em relação aos seus possíveis arranjos mecânicos, unidades horizontais são usuais com 1 ou 2 jatos, devido a uma maior simplicidade e custo menor, enquanto configurações verticais acomodam múltiplos jatos, 4 ou 6. com melhor simetria de esforços em potências elevadas (ESHA, 2004). Em máquinas multi-jato, os bocais são alimentados por um anel coletor, manifold, cada um com agulha e defletor próprios.

Figura 14 – Turbina Pelton com múltiplos injetores.



Fonte: (WEG S.A., s.d.).

4.5.4.2 Seleção preliminar

A seleção parte do par de projeto $H_{líq}$–Q do arranjo. Com esses valores, escolhe-se uma rotação-alvo para o acoplamento elétrico de modo que, no ponto de melhor rendimento, a razão entre a velocidade periférica da roda e a velocidade do jato ($k = u/V_j$) fique próxima de 0,47. Em seguida, dimensionam-se o bocal e a roda, escolhendo o diâmetro do jato que escoa a vazão de projeto com perdas contidas. Para orientar o porte da roda usa-se o chamado "índice de jato", que é a razão entre o diâmetro da roda e o diâmetro do jato A partir daí, define-se o número de conchas ao redor da roda e quantos jatos a unidade terá (ESHA, 2004).

4.5.4.3 Curvas e parcialização

A eficiência cresce até o BEP em torno de $k \approx 0{,}47$ e cai fora desse ponto por perdas de incidência, contração e respingo (DIXON; HALL, 2014). Em máquinas multi-jato, a parcialização faz-se em degraus, desligando jatos, com pequenos ajustes de agulha para manter k próximo do ótimo, minimizando perdas e vibração (ESHA, 2004).

4.5.4.4 Componentes

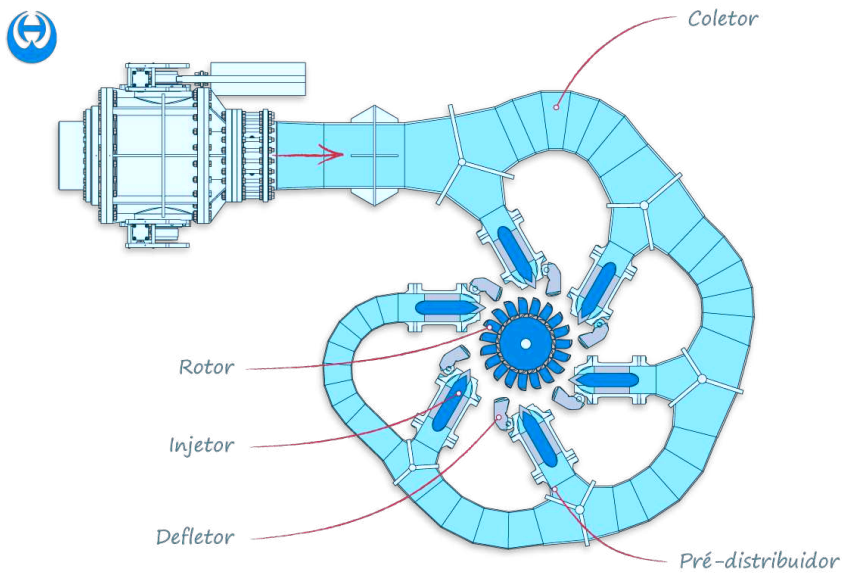
O circuito hidráulico inicia no injetor, onde a pressão é convertida em velocidade e o jato é formado com boa colimação. A agulha de regulação avança ou recua axialmente dentro do bocal para modular a vazão sem alterar a direção do jato, sendo acionada por servomotor. Em máquinas com vários jatos, cada injetor possui sua própria agulha e acionamento (ESHA, 2004).

Para rejeições rápidas de carga, cada bocal dispõe de um defletor: uma pá que intercepta o jato e o desvia para fora da roda, reduzindo o torque quase instantaneamente sem fechar bruscamente a agulha, o que mitigaria golpes de aríete. Em paradas e contenção de sobrevelocidade utiliza-se ainda o jato de freio, um bocal auxiliar que lança água na direção contrária ao movimento da roda (CHAUDHRY, 2014).

A roda carrega conchas com um divisor central (*splitter*) que reparte o jato em duas lâminas, permitindo grande deflexão com baixa perda. O desenho das conchas, bordas de entrada e saída, cavidade e canaletas, visa minimizar respingos e choques, maximizando a troca de momento. Materiais e revestimentos são escolhidos para resistir à erosão em altos carregamentos (DIXON; HALL, 2014).

A água descarregada é recolhida por um coletor e conduzida ao canal de fuga. Em unidades com múltiplos jatos, um manifold anular distribui a vazão da adutora para os bocais com perdas equilibradas. O conjunto mecânico integra eixo, mancais e vedações, além dos atuadores dos defletores, comandados pelos reguladores e alimentados pela unidade hidráulica de regulação de velocidade (ESHA, 2004).

Figura 15 – Esquema construtivo de turbina Pelton vertical.



Fonte: (Hydrowheel$_{P}$*elton*, s.d.).

4.5.4.5 Cavitação e erosão

Embora a Pelton não utilize tubo de sucção, a cavitação erosiva pode ocorrer no divisor e na borda de saída das conchas em quedas muito altas. É possível mitigar esses efeitos por geometria otimizada, materiais de revestimento adequados e controle de sólidos,

desarenadores (FRANC; MICHEL, 2004).

4.6 Sistemas auxiliares das turbinas (SAT)

Os sistemas auxiliares das turbinas asseguram operação segura, eficiente e ambientalmente adequada ao prover funções de regulação de velocidade e potência, acionamentos hidráulicos, lubrificação e mancais, vedações, refrigeração, drenagem e esgotamento, admissões/ventilações no tubo de sucção, instrumentação, monitoramento e intertravamentos em todas as famílias de máquinas (MOSONYI, 1991).

4.6.1 Unidade Hidráulica de Regulação de Velocidade (UHRV)

A regulação primária de velocidade atua sobre as superfícies móveis — distribuidor na Francis, pá de passo e distribuidor na Kaplan e defletor na Pelton — para manter a estabilidade eletromecânica frente a variações de carga e frequência do sistema (IEEE POWER & ENERGY SOCIETY, 2014). A UHRV fornece pressão e vazão hidráulica aos servomecanismos por meio de reservatório, conjuntos moto-bomba, acumuladores, manifold de válvulas, filtros e dispositivos de segurança, usualmente com redundância funcional e monitoramento de condição (ISO, 2010).

4.6.2 Lubrificação, mancais e refrigeração

Conjuntos de mancais radiais e de escora do eixo principal operam em regime hidrodinâmico com circulação de óleo e controle de temperatura com alarmes e atuações associados. A remoção de calor pode ser feita por trocadores água-óleo e por gestão de vazão, mantendo as folgas e o filme lubrificante dentro de limites de projeto (MOSONYI, 1991).

4.6.3 Vedações e integridade ambiental

As vedações limitam infiltrações e a migração água–óleo, protegendo mancais e volumes pressurizados, além de minimizar riscos ambientais (MOSONYI, 1991). Em Kaplan, o cubo do rotor demanda arranjos de vedação e condicionamento do fluido interno compatíveis com os ciclos de carga e as pressões de serviço (NOVAK et al., 2010). Em Pelton, a estanqueidade em injetores, agulha e interfaces do defletor é determinante para a estabilidade do jato e para a eficiência em regimes transitórios (DIXON; HALL, 2014).

4.6.4 Drenagem, esgotamento e ventilações

Sistemas de drenagem e esgotamento removem infiltrações de carcaças, poços de sucção e galerias, com bombeamento automatizado e detecção de níveis, prevenindo

alagamentos e contaminações cruzadas (MOSONYI, 1991). Em turbinas de reação, admissões de ar e ventilações no tubo de sucção são empregadas para atenuar pulsações de pressão e melhorar o escoamento em cargas parciais, reduzindo esforços dinâmicos e perdas associadas (NOVAK et al., 2010). Nas Pelton, a prioridade recai sobre drenagem de carcaças e coletores, com arranjos que evitam retenção de água que possa interferir na integridade do jato e no rendimento em regime (FRANC; MICHEL, 2004).

4.6.5 Instrumentação, monitoramento e intertravamentos

A instrumentação típica abrange pressões de UHRV, níveis de reservatórios, temperaturas de mancais, óleo e/ou água, vibrações e deslocamentos, posições de pás-guia, pá de passo, agulha e defletor, além de parâmetros acústicos para detecção de cavitação e fluxos auxiliares (NOVAK et al., 2010). Intertravamentos devem garantir, por exemplo, prioridade do defletor sobre o fechamento rápido da agulha em Pelton, bloqueio de partida sem pressão mínima na UHRV e permissivos associados a temperaturas e níveis nos sistemas de lubrificação (IEEE POWER & ENERGY SOCIETY, 2014). Os limites de vibração e critérios de alarme e desligamento devem observar normas específicas para hidrogeradores, com registros e análises de tendência para sustentar decisões de manutenção (ISO, 2018).

4.7 Geradores Elétricos

Os geradores elétricos da unidade hidrelétrica convertem a potência mecânica fornecida pelo conjunto turbina–eixo em potência elétrica, em frequência e tensão compatíveis com a interligação ao transformador elevador e, consequentemente, ao sistema elétrico (HUNTER-RINDERLE; SIOSHANSI, 2021). Nas aplicações hidro, predominam máquinas síncronas de polos salientes, projetadas para operar em baixas rotações e altos torques, em coerência com a natureza do acionamento hidráulico. A construção, o sistema de ventilação e a isolação do estator são dimensionados para assegurar desempenho eletromagnético, térmico e mecânico estável ao longo da faixa operativa da usina (GOZDOWIAK, 2020).

A importância do gerador no arranjo da casa de força é dupla: além de efetivar a conversão de energia, ele participa ativamente do controle do ponto operante da unidade geradora. Pela sua excitação, o gerador contribui para a regulação de tensão e para o balanço de potência reativa do barramento; pela coordenação com o regulador de velocidade e a hidráulica da turbina, sustenta a entrega de potência ativa conforme a demanda do despacho. Confiabilidade, eficiência e capacidade de suportar transitórios são, portanto, requisitos centrais para garantir disponibilidade da unidade, qualidade de tensão e estabilidade do sistema ao qual se conecta (AIBANGBEE, 2016).

4.7.1 Princípios de funcionamento

O gerador síncrono empregado em hidrogeração realiza a conversão eletromecânica por acoplamento magnético entre o campo do rotor, excitado em corrente contínua, e o enrolamento trifásico do estator. A energia mecânica proveniente da turbina imprime rotação ao eixo, fazendo com que o fluxo por polo corte as espiras do estator e induza forças eletromotrizes defasadas de 120. Em regime permanente, a relação entre velocidade mecânica, número de polos e frequência elétrica é rígida, sendo dada por

$$n_s = \frac{120\, f}{P}, \tag{4.11}$$

o que, nas unidades hidráulicas, conduz à adoção de elevado número de polos para compatibilizar baixas rotações com a frequência da rede (IEC, 2022).

4.7.1.1 Fluxo, tensão e papel da excitação

A tensão gerada decorre do fluxo magnético que cruza as espiras do estator. Esse fluxo é estabelecido pela corrente de campo no rotor e pode ser ajustado pelo sistema de excitação, elevando ou reduzindo a força eletromotriz induzida. Em vazio, a tensão terminal acompanha de perto a força eletromotriz interna. Sob carga, a corrente do estator produz reação de armadura que deforma o fluxo principal e gera queda de tensão nos elementos reativos. Dessa forma, manter a mesma tensão em diferentes níveis de carga requer ajuste de excitação realizado automaticamente pelo regulador de tensão (AVR) (ZHU et al., 2022).

4.7.1.2 Operação em carga e controle do ponto operante

Com a unidade conectada à rede, a potência ativa é majoritariamente determinada pela abertura hidráulica da turbina, enquanto a potência reativa e a tensão terminal são reguladas pelo sistema de excitação. Uma representação clássica usa a reatância síncrona X_s:

$$\underline{E} = \underline{V} + jX_s\,\underline{I}, \tag{4.12}$$

onde $\underline{E}$ é a força eletromotriz interna por fase, $\underline{V}$ a tensão terminal e $\underline{I}$ a corrente de estator. A transferência de potência ativa depende do ângulo de carga δ, entre $\underline{E}$ e $\underline{V}$, sendo, em primeira ordem,

$$P \approx \frac{EV}{X_s}\,\sin\delta. \tag{4.13}$$

Para uma mesma potência ativa, variar a excitação desloca o ponto de operação no eixo do reativo: sobreexcitação tende a injetar Q na barra, enquanto uma subexcitação tende a absorver Q. As chamadas curvas em V mostram que existe um ponto de excitação que minimiza a corrente do estator (e, portanto, o aquecimento) para cada nível de potência ativa.

4.7.1.3 Sincronismo e grandezas de supervisão

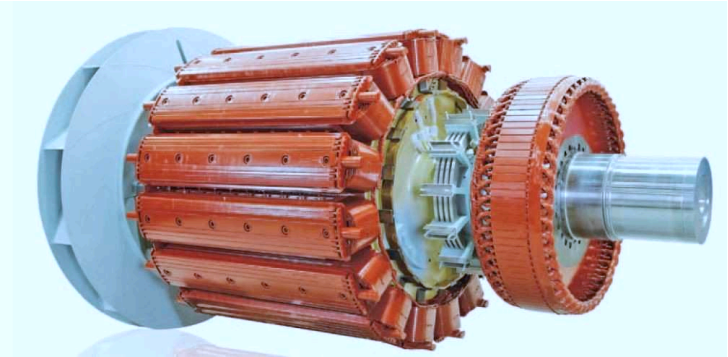
O processo é intrinsecamente síncrono: o campo do rotor "trava" com o campo resultante do estator na frequência da rede. Em operação, monitoram-se grandezas elétricas, como tensão, corrente e fator de potência, e mecânicas, como velocidade, posição hidráulica e vibração, além de temperaturas de enrolamentos e mancais. Essas variáveis alimentam o AVR e o regulador de velocidade, permitindo manter tensão e potência ativa dentro de referências e limites do equipamento, assegurando injeção estável de potência no transformador elevador e no barramento da usina (IEC, 2022).

4.7.1.4 Rotores de polos salientes e rotores lisos

Em máquinas síncronas, polo saliente e polo liso descrevem o formato físico do rotor. No rotor de polos salientes, cada polo magnético é um "dente" ou sapata que sobressai do corpo do rotor, permitindo enxergar os polos separados, com espaço entre eles, o que facilita ter muitos polos e um grande diâmetro, ideal para baixas rotações e alto torque. Já o rotor de polos lisos é essencialmente cilíndrico, com superfície externa quase uniforme, o enrolamento de campo fica embutido em ranhuras do próprio cilindro, resultando em poucos polos e aptidão para altas rotações (MELKEBEEK, 2018).

Do ponto de vista eletromagnético, a saliência torna o entreferro "direcional", resultando em comportamento levemente diferente nos eixos direto e em quadratura, aspecto relevante para modelagem, controle e proteção. Já o rotor liso é mais "isotrópico", simplificando a análise em regime permanente. Em termos práticos de seleção, polos salientes costumam ser adotados para máquinas de baixa rotação e grande torque, enquanto o rotor liso é melhor aplicável para projetos com alta rotação e baixa contagem de polos (MA et al., 2023).

Figura 16 – Rotor de pólos salientes.



Fonte: (OLIVEIRA, 2021).

4.7.1.5 Considerações térmicas, ventilação e eficiência

As perdas totais decorrem de componentes no cobre, referente ao estator e campo, no ferro, devido à histerese e correntes parasitas, mecânicas, como em mancais e ventilação, e adicionais, por exemplo distorções harmônicas. Em geradores hidráulicos de grande diâmetro, é usual a ventilação fechada com trocadores ar–água, integrados ao sistema de água de serviço da usina, de modo a manter as elevações de temperatura dentro da classe térmica especificada e garantir a vida útil da isolação (HOLZER et al., 2020).

4.7.2 Construção e arranjos

A construção dos geradores empregados em hidrogeração é orientada por baixas rotações, altos torques e grandes diâmetros, com ênfase em robustez mecânica, desempenho térmico e confiabilidade elétrica. Predominam máquinas síncronas de polos salientes com estator de ranhuras abertas ou semiabertas, enrolamento trifásico de bobinas formadas e sistema de ventilação fechado com trocadores ar–água. Os requisitos de desempenho, elevação de temperatura, ensaios e marcações são estabelecidos por normas de máquinas girantes, que também fixam parâmetros de especificação para aceitação do equipamento em fábrica e em campo (IEC, 2022).

4.7.2.1 Estator

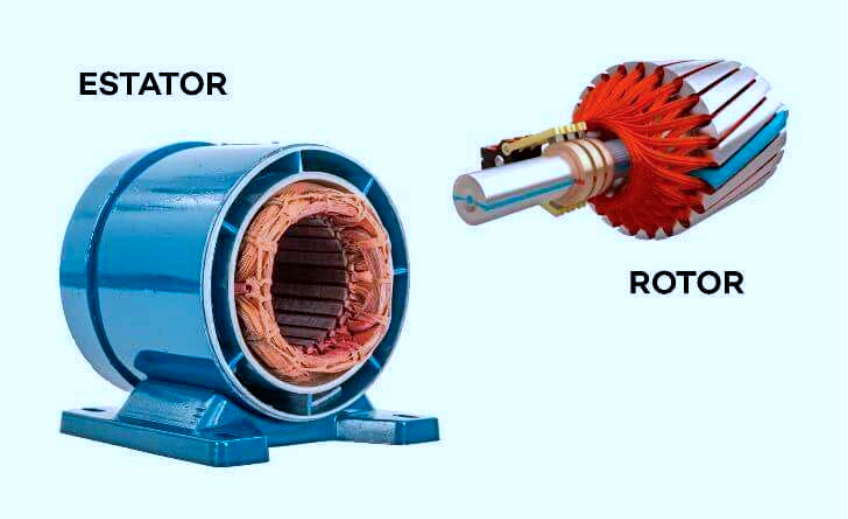
O estator é a parte fixa do gerador responsável por alojar o enrolamento trifásico onde se induz a tensão elétrica e por prover o caminho magnético principal do conversor eletromecânico. Em projetos de hidrogeração, ele assume diâmetros elevados e deve combinar rigidez mecânica, desempenho magnético e boa dissipação térmica, pois concentra as perdas no cobre e no ferro durante o serviço contínuo da unidade.

O sistema de isolação do enrolamento emprega materiais de alta resistência térmica e dielétrica e processo de impregnação a vácuo e pressão (VPI), de modo a controlar o "textitstress"elétrico nas regiões de fim de ranhura e cabeças de bobina, limitar descargas parciais e assegurar vida útil da isolação sob ciclos térmicos.

4.7.2.2 Rotor

O rotor é a parte girante do gerador responsável por criar o campo magnético que, ao cortar os enrolamentos do estator, induz a tensão trifásica. Do ponto de vista construtivo, o núcleo do rotor é usinado para receber as sapatas polares, onde o enrolamento de campo é cunhado e isolado. A alimentação do campo pode ocorrer por anéis coletores e escovas, quando há excitação estática, ou por meio de excitação *brushless*, excitatriz CA no eixo e retificador girante, que elimina escovas em regime permanente (MAJER; TUKOVIĆ, 2021).

Figura 17 – Exemplo de ilustração de estator e rotor.



Fonte: (NEOSOLAR, s.d.).

4.7.2.3 Ventilação e arrefecimento

Ventilação e arrefecimento definem como o calor gerado por perdas elétricas, magnéticas e mecânicas é removido da máquina para manter as temperaturas dentro da classe térmica especificada. A norma IEC 60034-6 usa códigos "IC" (*International Cooling*) para indicar, de forma padronizada, suas possíveis configurações, como exemplificado a seguir:

Tabela 1 – Exemplos de códigos de resfriamento (IEC 60034-6)

Código IC	**Descrição**
IC01	**Aberto, autoventilado em ar ambiente.** O ar circula livremente entre a máquina e o ambiente por aberturas.
IC21	**Aberto, ventilação forçada.** Mantém seu circuito aberto, mas o fluxo de ar é garantido por ventilador externo (ventilador auxiliar).
IC411	**Fechado, carcaça aletada.** O ar interno recircula dentro da carcaça. Um ventilador externo força ar externo sobre as aletas da carcaça para retirar o calor. Não há troca direta entre ar interno e ambiente.
IC611	**Fechado, trocador ar–ar.** O ar interno recircula pelo interior da máquina e passa por um trocador ar–ar montado na carcaça. O ar externo resfria o trocador.
IC81W	**Fechado, trocador ar–água.** O ar interno recircula e entrega o calor a um trocador ar–água. A água da instalação remove o calor do trocador.

Fonte: (IEC, 2020b).

4.7.2.4 Grau de Proteção

O invólucro é a estrutura externa que protege os componentes internos da máquina elétrica contra a entrada de corpos estranhos, poeira e água, além de oferecer superfície para fixação de sistemas de ventilação e dutos de resfriamento. Seu grau de proteção é definido pelo código IP (*Ingress Protection*), normalizado internacionalmente, que utiliza dois dígitos para indicar o nível de barreira contra objetos sólidos e contra líquidos. A correta escolha do grau de proteção é essencial, pois garante que o equipamento opere em condições ambientais adversas de usinas, preservando a isolação, evitando falhas por contaminação e assegurando a durabilidade do conjunto (IEC, 2020a).

Tabela 2 – Exemplos de graus de proteção (IEC 60034-5)

Código IP	**Descrição**
IP20	Proteção contra toque de dedos e objetos maiores que 12 mm, não há proteção contra água.
IP21	Proteção contra toque de dedos e objetos maiores que 12 mm, além de proteção contra gotas verticais de água.
IP54	Proteção contra poeira em quantidade prejudicial e contra respingos de água de qualquer direção.
IP55	Proteção completa contra poeira e contra jatos de água de baixa pressão provenientes de qualquer direção.

Fonte: (IEC, 2020a).

4.7.2.5 Sistema de excitação *brushless* e estático

O sistema de excitação é o conjunto responsável por fornecer corrente contínua ao enrolamento de campo do rotor, criando o fluxo magnético essencial para a geração de energia elétrica. Sem excitação, o gerador não estabelece tensão em seus terminais. Existem dois arranjos principais, o sistema *brushless* e o sistema estático. No arranjo *brushless*, uma pequena máquina elétrica chamada excitatriz é montada no próprio eixo do gerador, ela produz corrente alternada que é retificada por um conjunto de diodos girantes, os quais são fixados também no eixo, transformando-a em corrente contínua que alimenta diretamente o campo do rotor. A principal característica é que não há necessidade de escovas em operação contínua, por isso o nome *brushless* (sem escovas), reduzindo manutenção e riscos de desgaste mecânico (PALLANTLA et al., 2020).

Já o sistema estático posiciona o conversor de potência fora do eixo, em painéis fixos, geralmente utilizando tiristores ou IGBTs. Nesse caso, a corrente contínua é conduzida ao rotor por meio de anéis coletores e escovas. Embora demande manutenção desses contatos, esse arranjo oferece resposta mais rápida, maior capacidade de controle e funções avançadas, como reforço temporário de campo em distúrbios do sistema elétrico. Em ambos os casos,

o sistema de excitação trabalha em conjunto com o regulador automático de tensão (AVR), que ajusta a corrente de campo de acordo com as variações de carga e tensão, assegurando a estabilidade do gerador e a qualidade da energia entregue (IEEE, 2005).

4.7.3 Operação, sincronismo e modos

A operação de um gerador síncrono envolve a sequência de procedimentos que permitem sua entrada em serviço, o controle do ponto de operação quando conectado à rede elétrica e a sua retirada segura em paradas programadas ou contingenciais. Em uma usina hidrelétrica, essa operação não depende apenas do gerador, mas resulta da coordenação entre turbina, regulador de velocidade, sistema de excitação, dispositivos de proteção e supervisão, de modo a assegurar integridade do equipamento, segurança operacional e qualidade da energia fornecida.

4.7.3.1 Sequência de partida e sincronismo

Com a turbina liberada, o regulador de velocidade conduz o rotor até a rotação próxima da velocidade síncrona. Nesse ponto aplica-se a excitação, por meio do sistema *brushless* ou estático, para estabelecer tensão no gerador e possibilitar o ajuste fino de grandezas elétricas (PALLANTLA et al., 2020).

O sincronismo é a etapa em que o gerador é conectado ao sistema elétrico. Para isso, três condições fundamentais precisam ser atendidas: mesma sequência de fases, valores compatíveis de tensão e frequência, e pequena diferença angular entre a tensão do gerador e a da barra. Esse processo garante que a inserção da unidade não provoque esforços mecânicos excessivos nem perturbações elétricas no barramento (IEEE, 1991).

4.7.3.2 Modos de operação: paralelo à rede e operação ilhada

Os geradores síncronos podem atuar em dois modos principais de operação. No funcionamento em paralelo ao sistema interligado, a unidade compartilha a carga com diversas outras máquinas conectadas à mesma rede. Na operação ilhada, utilizada em situações específicas e previamente autorizadas, o gerador passa a ser a principal referência de frequência e tensão para um subsistema isolado.

4.7.3.3 Sobrevelocidade e disparos de proteção

Eventos como rejeição total ou parcial de carga, afundamentos ou surtos de tensão e variações bruscas de frequência exigem respostas consistentes dos controles e das proteções. Em especial, a rejeição de carga provoca uma tendência à sobrevelocidade, situação em que a turbina continua fornecendo energia mecânica ao eixo enquanto a carga elétrica foi reduzida ou eliminada. Nessa condição, a rotação da unidade aumenta acima do valor

nominal, podendo atingir níveis que comprometam a integridade mecânica do conjunto girante.

Caso a sobrevelocidade ultrapasse limites predefinidos, ou ainda em situações de falha de controle, pode ocorrer o chamado disparo. Nesse disparo, dispositivos de proteção dedicados desligam a unidade, abrindo o disjuntor do gerador e acionando sistemas de segurança hidráulicos e mecânicos para interromper o fornecimento de energia ao eixo.

4.8 Reguladores e Sistemas de Controle

Os reguladores e sistemas de controle compõem a camada funcional que permite ao conjunto turbina–gerador operar de forma segura, eficiente e conforme os requisitos de despacho do sistema elétrico. Eles constituem a interface entre o processo físico de conversão de energia e as exigências de estabilidade, qualidade e continuidade da energia fornecida. No âmbito da hidrogeração, destacam-se dois blocos principais: o regulador de velocidade, responsável por ajustar a rotação da unidade e, consequentemente, a potência ativa entregue pela turbina, e o sistema de excitação com regulador de tensão, encarregado de manter a tensão terminal do gerador e de regular o intercâmbio de potência reativa com o barramento (WANG et al., 2021).

4.8.1 Visão geral e arquitetura de controle

A arquitetura de controle da unidade geradora organiza-se em camadas funcionais que vão do controle primário de processo aos sistemas de supervisão e intertravamento. No nível primário, dois elos são determinantes: o regulador de velocidade, que atua na abertura hidráulica da turbina para controlar rotação e, em paralelo, a potência ativa, e o sistema de excitação com regulador automático de tensão (AVR), responsável por manter a tensão terminal e o intercâmbio de potência reativa do gerador.

No nível de coordenação e sequência, a instrumentação associada, como medições de tensão e corrente, potência, velocidade, posições hidráulicas, temperaturas de enrolamentos e mancais, vibração, pressões e temperaturas do circuito ar–água, alimenta os controladores.

4.8.2 Regulador de velocidade e controle hidráulico

O regulador de velocidade é o sistema de controle primário que ajusta a rotação da unidade geradora por meio da atuação sobre as superfícies hidráulicas da turbina, comportas diretoras em Francis, pás em Kaplan ou bicos em Pelton. Sua especificação estabelece critérios de desempenho dinâmico, limites e ensaios que asseguram resposta previsível frente a variações de carga, atuando em conjunto com o sistema de excitação para manter a unidade dentro dos limites mecânicos, hidráulicos e elétricos (IEC, 1998).

4.8.2.1 Estrutura de controle e requisitos dinâmicos

O regulador de velocidade normalmente é organizado em duas camadas de controle que trabalham juntas. A primeira é a malha de posição hidráulica, ela mede o quanto as comportas, as pás ou os bicos da turbina estão abertas e faz o servossistema levar essa abertura para o valor pedido, com suavidade e sem oscilações. A segunda é a malha de velocidade e frequência, ela observa a rotação do eixo e decide qual abertura hidráulica deve ser pedida para atingir a rotação desejada.

4.8.2.2 Atuação hidráulica e UHRV

A atuação sobre as superfícies móveis da turbina é realizada por servomotores hidráulicos alimentados por uma Unidade Hidráulica do Regulador de Velocidade (UHRV) dedicada. Essa UHRV reúne reservatório, bombas, com redundância, acumuladores para suprir picos de demanda, bloco de válvulas, filtros em linha e instrumentação para monitorar pressão, temperatura, nível e contaminação do óleo. O comando de posição é feito por válvulas proporcionais ou servo-válvulas, enquanto blocos de segurança incorporam intertravamentos hidráulicos, válvulas de retenção e de alívio, assegurando que o movimento das comportas, pás ou bicos ocorra dentro de limites controlados e revertendo a um estado seguro em caso de falha (ZHANG et al., 2024).

Figura 18 – Unidade Hidráulica de Regulação de Velocidade (UHRV) — vista geral.



Fonte: (ENGINEERING, s.d.).

4.8.2.3 Limites operativos do regulador

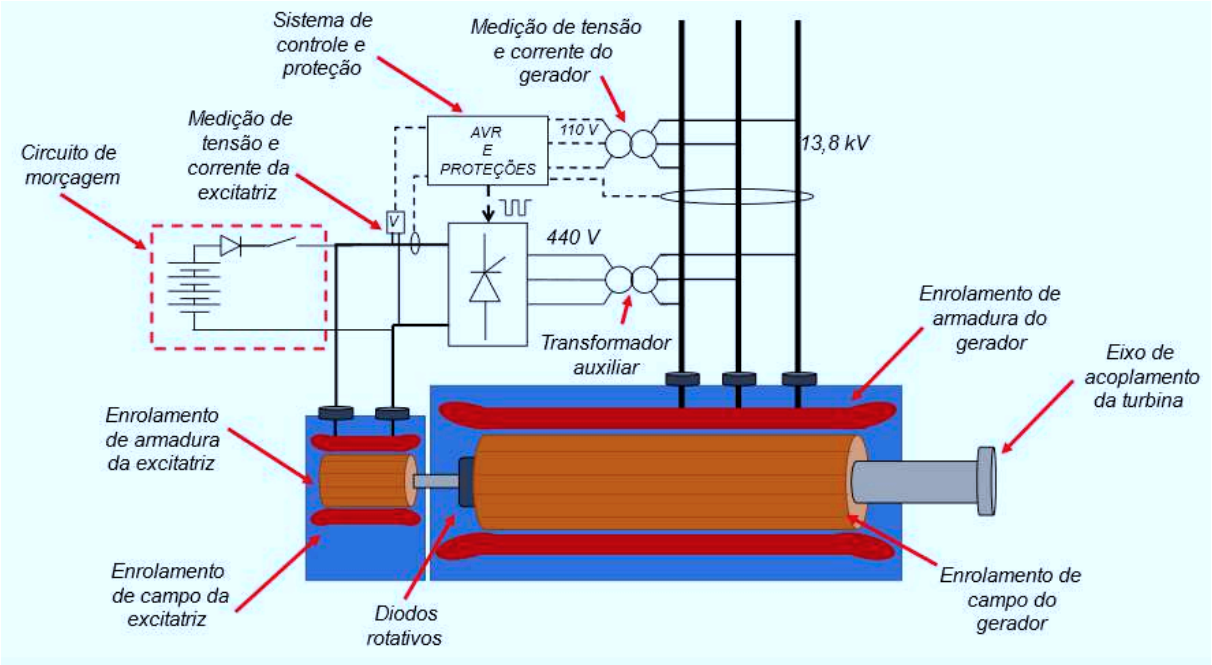
A operação segura do regulador de velocidade exige respeito a limites mecânicos e hidráulicos da turbina e do circuito de adução. Devem ser observados envelopes de abertura e de velocidade de manobra, zonas a evitar por risco de cavitação, limites de

rotação em regime de sobrevelocidade, gradientes máximos de abertura e fechamento e restrições de pressão no conduto forçado. Para cumprir esses limites, o sistema incorpora supervisões contínuas de pressão de óleo, posição e curso dos servomotores, além de posições mínima e máxima, com lógicas de bloqueio e permissivas integradas à sequência de partida, sincronismo, carregamento e parada da unidade. Essas salvaguardas impedem comandos que levem o conjunto a regiões não permitidas e asseguram que cada transição ocorra dentro das margens eletromecânicas especificadas (IEEE, 1991).

4.8.3 Sistema de excitação e regulador de tensão

O sistema de excitação é o subsistema que fornece corrente contínua ao enrolamento de campo do rotor e, com o regulador de tensão, controla a tensão terminal do gerador e o intercâmbio de potência reativa com o barramento. Sua função é central para a operação, durante a partida e o sincronismo, ele estabelece a condição elétrica para o acoplamento seguro (NØLAND; HØIDALEN; MOLINAS, 2019). Em regime, mantém a tensão dentro de referências e limites térmicos do conjunto. Em perturbações, contribui para a estabilidade ao ajustar rapidamente a excitação.

Figura 19 – Arquitetura exemplificativa de sistema de excitação com regulador de tensão.



Fonte: (TERMOBLOG, 2025).

4.8.3.1 Funções do regulador de tensão e modos operativos

O regulador de tensão atua sobre a excitação do gerador para manter a grandeza elétrica de interesse dentro de uma referência pré-definida. Em sua forma mais direta,

opera em modo de controle de tensão terminal, comparando a tensão medida nos terminais do gerador, ou no secundário do transformador, quando há compensação, com o valor de referência e ajustando a corrente de campo para reduzir o erro. Recursos usuais incluem compensação de queda de tensão em linha para "enxergar" o ponto de controle desejado e limitadores de taxa para suavizar variações de referência e de saída, preservando a estabilidade do conjunto (IEEE, 2016).

A seleção do modo e do ponto de ajuste depende do estado operacional e da filosofia da instalação. Durante partida e sincronismo, utiliza-se controle de tensão com referências e rampas compatíveis com a inserção na barra. Em operação paralela, adota-se tensão, potência reativa ou fator de potência conforme a meta de perfil de tensão e a impedância do transformador de acoplamento.

4.8.3.2 Limitadores do AVR e coordenação com proteções

O regulador de tensão incorpora limitadores cuja função é manter a operação do gerador dentro do envelope seguro definido por seus limites térmicos e de estabilidade. Esses limitadores devem interagir de forma previsível com o controlador principal do AVR, com prioridade e taxas de atuação bem definidas, de modo a prevenir saturações prolongadas e variações bruscas de tensão durante perturbações ou mudanças de referência (IEEE, 2016).

A coordenação com as proteções de máquina e de interface assegura seletividade e evita atuações conflitantes. Ensaios funcionais em comissionamento verificam a transferência de controle entre o AVR e seus limitadores, bem como a atuação coordenada com os relés, garantindo que o gerador permaneça dentro do contorno de capacidade sem comprometer a estabilidade do sistema (IEEE, 2006).

5 Conclusão

Este trabalho teve como propósito central desenvolver e documentar uma abordagem prática para a elaboração de manuais técnicos orientados a tarefas e aplicá-la na produção de um guia técnico introdutório para hidrogeração, adequado ao treinamento e à integração de novos colaboradores. Em resposta aos objetivos definidos, os resultados indicam que a proposta foi atingida: consolidou-se uma base normativa e metodológica compatível com o contexto brasileiro, estruturou-se um documento didático e navegável e validou-se uma macroestrutura de conteúdo capaz de servir como instrumento de nivelamento técnico e de consulta rápida.

Na metodologia, partiu-se de um levantamento de normas e documentações de qualidade, com destaque para diretrizes de informação para uso, numeração progressiva, referências e gestão da informação documentada. A partir desse repertório, foi possível estabelecer critérios de estruturação, padronização e usabilidade aplicáveis ao manual. As decisões foram testadas diretamente no corpo do guia, resultando em um manual técnico em obediência às exigências de clareza, termos consistentes e navegabilidade esperadas para materiais de capacitação técnica.

Do ponto de vista do conteúdo, organizou-se o guia em sequência, iniciado pelo nivelamento conceitual, tratando de conteúdos introdutórios, como cadeia de conversão de energia, potência, quedas e rendimento global, avançando para a visão de usinas, abordando sobre classificações por porte e por arranjo e estruturas civis, e finalizando na descrição das famílias de turbinas, descrevendo principalmente as turbinas Francis, Kaplan e Pelton e seus respectivos sistemas auxiliares. Essa sequência conecta fundamentos e aplicações, favorecendo tanto a leitura quanto a consulta por tópico.

Entre as contribuições práticas destacam-se:

1. A tradução de requisitos normativos em orientações referentes à escrita e formatação;

2. A entrega de um guia introdutório com padronização de linguagem e de elementos gráficos, adequado ao ingresso de novos profissionais;

3. A definição de um arranjo documental que facilita a revisão e melhoria do material.

Em conjunto, esses aspectos convertem o manual em um documento de fácil atualização e de apoio para atividades de treinamento e de referência no cotidiano.

Como todo material introdutório, o escopo apresenta limitações. O guia concentra-se em fundamentos da hidrogeração, nas classificações de usinas e nas turbinas com seus sistemas auxiliares, sem abordar assuntos correlatos de outras disciplinas da usina. O

uso de termos técnicos foi escolhido visando um nivelamento inicial, a fim de facilitar a compreensão, padronização e aplicabilidade.

Essas limitações sugerem um conjunto de perspectivas para trabalhos futuros e para a evolução do próprio manual. Entre as sugestões, destacam-se:

- Ampliação de escopo técnico: inclusão de capítulos introdutórios sobre transformadores elevadores e serviços auxiliares; Proteção, comando, automação e supervisão; Integração elétrica da usina, como subestações, barramentos e arranjos de conexão.
- Integração operacional: desenvolvimento de procedimentos operacionais e de manutenção, listas de verificação e fluxos de decisão.
- Aspectos civis e hidráulicos avançados: aprofundamento de tópicos como transitórios hidráulicos e interfaces civis críticas à operação, com exemplos de dimensionamento e implicações operativas.
- Usinas reversíveis (PSH): seção dedicada às particularidades de operação e de controle em arranjos de bombeamento e turbinamento.
- Medição de eficácia e governança do conteúdo: estruturação de indicadores de aprendizagem e de uso, por exemplo tempo de integração, taxa de erro, dúvidas recorrentes, e consolidação de um processo de revisão periódica, registro de versões e incorporação de feedback de leitores-alvo.
- Edição e acesso: avaliação de formatos digitais interativos, com o intuito de incrementar a acessibilidade e visualização ao conteúdo.

Em síntese, este trabalho cumpriu o que se propôs: estabeleceu, com base normativa clara, um modo de produzir informação técnica e demonstrou sua aplicação na forma de um guia introdutório de hidrogeração. O produto entregue é aberto à evolução, de modo que novas seções, relativas às demais etapas e sistemas da usina, possam ser incorporadas sem perda de coesão. Ao unir rigor técnico e processo de gestão documental, o manual consolida-se como ferramenta de apoio à capacitação e como alicerce para a continuidade de uma documentação técnica cada vez mais completa, segura e essencial às necessidades profissionais do mercado.

Referências

ABNT. **ABNT NBR 6024: Informação e documentação — Numeração progressiva das seções de um documento — Apresentação**. Rio de Janeiro, 2012. (Citado 4 vezes nas páginas 7, 12, 13 e 14).

ABNT. **ABNT NBR 10719: Informação e documentação — Relatório técnico e/ou científico — Apresentação**. Rio de Janeiro, 2015. (Citado na página 5).

ABNT. **ABNT NBR ISO 9001: Sistemas de gestão da qualidade — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2015. (Citado 3 vezes nas páginas 8, 9 e 12).

ABNT. **ABNT NBR 6023: Informação e documentação — Referências — Elaboração**. Rio de Janeiro, 2018. Versão corrigida e/ou revisada em 2023. (Citado 2 vezes nas páginas 6 e 12).

ABNT. **ABNT NBR 6027: Informação e documentação — Sumário — Apresentação**. Rio de Janeiro, 2021. (Citado 3 vezes nas páginas 5, 7 e 12).

ABNT. **ABNT NBR 6028: Informação e documentação — Resumo — Apresentação**. Rio de Janeiro, 2021. (Citado 2 vezes nas páginas 5 e 7).

ABNT. **ABNT NBR ISO 10013: Sistemas de gestão da qualidade — Orientação para informação documentada**. Rio de Janeiro, 2021. (Citado 5 vezes nas páginas 1, 9, 11, 12 e 13).

ABNT. **ABNT NBR 10520: Informação e documentação — Citações em documentos — Apresentação**. Rio de Janeiro, 2023. (Citado na página 7).

ABNT. **Quem somos?** 2025. Disponível em: <https://abnt.org.br/institucional/sobre-abnt-2>. (Citado na página 4).

ABRAPCH. **O que são PCHs e CGHs?** s.d. Esquema geral utilizado na Figura 8. Disponível em: <https://abrapch.org.br/2014/03/o-que-sao-pchs-e-cghs>. (Citado na página 26).

ACREMAN, M.; DUNBAR, M. J. Defining environmental river flow requirements — a review. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 8, n. 5, p. 861–876, 2004. (Citado na página 28).

AIBANGBEE, J. O. Voltages and reactive power controls in power system network using automatic voltage regulator (avr) and static var compensator methods. **IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)**, v. 11, n. 1, p. 29–34, 2016. Version II (Jan.–Feb.). Disponível em: <https://iosrjournals.org/iosr-jeee/Papers/Vol11%20Issue%201/Version-2/D011122934.pdf>. (Citado na página 38).

ANA. **ANA publica regras de operação de reservatórios de hidrelétricas da bacia hidrográfica do Rio Grande (MG–SP)**. s.d. Imagem utilizada na Figura 6. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/an

a-publica-regras-de-operacao-de-reservatorios-de-hidreletricas-da-bacia-hidrografica-do-rio-grande-mg-sp>. (Citado na página 25).

ANEEL. **Resolução Normativa nº 875, de 10 de março de 2020: Texto compilado**. 2020. Atualizada até a REN nº 1.079/2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2020875.html>. (Citado na página 24).

ANEEL. **ANEEL**. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231070.html>. (Citado na página 24).

ANEEL. **Brasil supera a marca de 210 GW instalados**. 2025. <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2025/brasil-supera-a-marca-de-210-gw-instalados>. Publicado em 7 mai. 2025. Acesso em 10 set. 2025. (Citado na página 2).

ANEEL. **Leilão negocia R$ 26,5 bilhões e viabiliza a construção de 65 usinas de fonte hidráulica**. 2025. <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2025/leilao-negocia-r-26-5-bilhoes-e-viabiliza-a-construcao-de-65-usinas-de-fonte-hidraulica>. Publicado em 22 ago. 2025. Acesso em 10 set. 2025. (Citado na página 2).

ASCE. **Steel Penstocks**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2012. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 79. (Citado na página 27).

BRENNEN, C. E. **Cavitation and Bubble Dynamics**. New York: Oxford University Press, 1995. (Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21).

CCEE. **CCEE e ANEEL realizam leilão histórico que vai gerar R$ 5,5 bilhões em investimentos e R$ 864 milhões em economia ao consumidor**. 2025. <https://www.ccee.org.br/-/ccee-e-aneel-realizam-leilao-historico-que-vai-gerar-r-5-5-bilhoes-em-investimentos-e-r-864-milhoes-em-economia-ao-consumidor>. Publicado em 22 ago. 2025. Acesso em 10 set. 2025. (Citado na página 2).

CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018. (Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18).

CHAUDHRY, M. H. **Applied Hydraulic Transients**. 3. ed. New York: Springer, 2014. (Citado 5 vezes nas páginas 22, 23, 27, 30 e 36).

DIXON, S. L.; HALL, C. A. **Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery**. 7. ed. Oxford: Butterworth–Heinemann/Elsevier, 2014. (Citado 13 vezes nas páginas 17, 19, 20, 21, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36 e 37).

ENGINEERING, W. H. **Hacker Industries — Hydraulic Units (UHRV)**. s.d. Wenckus Hydro Engineering. Página institucional sem data explícita de publicação. Disponível em: <https://www.wenckushydroengineering.com/hacker.asp>. (Citado na página 46).

EPE. **Balanço Energético Nacional 2025: Ano-base 2024**. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. (Citado na página 17).

EPE. **Leilão de Energia Nova A-5 de 2025: Informe de Habilitados e Vencedores**. 2025. <https://www.epe.gov.br/pt/leiloes-de-energia/leiloes/leilao-de-energia-nova-a5-2025>. Publicado em 22 ago. 2025. Acesso em 10 set. 2025. (Citado na página 2).

ESHA. **Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant**. Brussels, 2004. Manual técnico para PCH/CGH. (Citado 3 vezes nas páginas 34, 35 e 36).

FRANC, J.-P.; MICHEL, J.-M. **Fundamentals of Cavitation**. Dordrecht: Springer, 2004. (Citado 6 vezes nas páginas 21, 30, 31, 33, 37 e 38).

GOZDOWIAK, A. Faulty synchronization of salient pole synchronous hydro generator. **Energies**, MDPI, v. 13, n. 20, p. 5491, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13205491>. (Citado na página 38).

Hidroenergia. **Tipos de turbinas hidráulicas**. s.d. Figura de campos de aplicação (queda × vazão). Disponível em: <https://www.hidroenergia.com.br/blog/tipos-turbinas-hidraulicas/>. (Citado na página 29).

HOLZER, T. et al. Generator design possibilities for full-size converter operation of large pumped storage power plants. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 56, n. 4, p. 3644–3655, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2989074>. (Citado na página 41).

HUNTER-RINDERLE, R.; SIOSHANSI, R. Data-driven modeling of operating characteristics of hydroelectric generating units. **Current Sustainable/Renewable Energy Reports**, v. 8, p. 199–206, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40518-021-00197-1>. (Citado na página 38).

Hydrowheel$_{F}$*rancis*.**Francis simples vertical**.*s.d.*<>. Esquema construtivo de turbina Francis vertical. Acesso em: 09 set. 2025. (Citado na página 31).

Hydrowheel$_{K}$*aplan*.**Kaplan jusante**.*s.d.*<>. Esquema construtivo de turbina Kaplan de jusante. Acesso em: 09 set. 2025. (Citado na página 34).

Hydrowheel$_{P}$*elton*.**Pelton vertical**.*s.d.*<>. Esquema construtivo de turbina Pelton vertical. Acesso em: 09 set. 2025. (Citado na página 36).

IEA. **Hydropower Special Market Report**. 2021. Classificação por arranjo (reservoir, run-of-river, pumped storage) e serviços. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report>. (Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25).

IEA. **Hydropower (Hydroelectricity)**. 2024. Participação da hidro na geração renovável global (2023). Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/hydroelectricity>. (Citado na página 17).

IEC. **IEC 60041**. Geneva, 1991. Inclui Corrigendum 1 (1996). Disponível em: <https://webstore.iec.ch>. (Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20).

IEC. **IEC 61362**: Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines — guide for dynamic performance acceptance tests. Geneva, 1998. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/>. (Citado na página 45).

IEC. **IEC 60193**. Geneva, 1999. Disponível em: <https://webstore.iec.ch>. (Citado 3 vezes nas páginas 21, 32 e 33).

IEC. **IEC 60034-2-1**. Geneva, 2014. Disponível em: <https://webstore.iec.ch>. (Citado na página 20).

IEC. **IEC 60034-5: Rotating electrical machines — Part 5: Degrees of protection provided by the integral design of rotating electrical machines (IP code) — Classification**. Geneva, 2020. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/en/publication/60218>. (Citado na página 43).

IEC. **IEC 60034-6: Rotating electrical machines — Part 6: Methods of cooling (IC code)**. Geneva, 2020. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/en/publication/60384>. (Citado na página 42).

IEC. **IEC 60034-1: Rotating electrical machines — Part 1: Rating and performance**. Geneva, 2022. Edition 14.0. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/en/publication/65446>. (Citado 3 vezes nas páginas 39, 40 e 41).

IEC/IEEE. **IEC/IEEE 82079-1: Preparation of information for use (instructions for use) of products — Part 1: Principles and general requirements**. Geneva, 2019. (Citado 5 vezes nas páginas 1, 10, 11, 12 e 13).

IEEE. 1991. (Citado 2 vezes nas páginas 44 e 47).

IEEE. 2005. (Citado na página 44).

IEEE. 2006. (Citado na página 48).

IEEE. 2016. (Citado na página 48).

IEEE POWER & ENERGY SOCIETY. **IEEE Std 1207-2014**. Piscataway, NJ, 2014. (Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38).

Indeba. **Você sabe o que é cavitação de bombas? Veja como a equipe técnica Indeba pode te ajudar**. 2025. Disponível em: <https://www.indeba.com.br/voce-sabe-o-que-e-cavitacao-de-bombas-veja-como-a-equipe-tecnica-indeba-pode-te-ajudar>. (Citado na página 22).

ISO. **ISO 4413**. Geneva, 2010. (Citado na página 37).

ISO. **ISO 20816-5**. Geneva, 2018. (Citado na página 38).

MA, Z. et al. Analysis and optimization of rotor salient pole reluctance considering multi–modulation orders. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 70,

p. 10871–10880, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3229305>. (Citado na página 40).

MAJER, S.; TUKOVIĆ, Ž. Influence of rotor design on the generation of windage power loss in salient pole generators. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 57, n. 4, p. 3229–3237, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3072358>. (Citado na página 41).

MELKEBEEK, J. A. The synchronous machine. In: **Electrical Machines and Drives: Fundamentals and Advanced Modelling**. Cham: Springer, 2018. p. 165–207. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72730-1_5>. (Citado na página 40).

MME/EPE. **Plano Nacional de Energia 2030: Geração Hidrelétrica**. Brasília: MME/EPE, 2007. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Hidrel%C3%A9trica.pdf>. (Citado na página 24).

ModoPump. **Introduction to the terms of centrifugal pump**. 2022. Figura explicativa de *water hammer*. Disponível em: <https://pt.modopumpcn.com/info/introduction-to-the-terms-of-centrifugal-pump-72051523.html>. (Citado na página 23).

MOSONYI, E. **Water Power Development, Volume II: High-Head Power Plants**. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1991. (Citado 7 vezes nas páginas 28, 29, 30, 32, 34, 37 e 38).

NEOSOLAR. **Como funciona o motor do carro elétrico**. s.d. NeoSolar. Página informativa. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/como-funciona-motor>. (Citado na página 42).

NØLAND, J.; HØIDALEN, H. K.; MOLINAS, M. Excitation system technologies for wound-field synchronous machines: Survey of solutions and evolving trends. **IEEE Access**, IEEE, v. 7, p. 109699–109718, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2933493>. (Citado na página 47).

NOVAK, P. et al. **Hydraulic Structures**. 4. ed. London: Taylor & Francis, 2010. (Citado 8 vezes nas páginas 27, 28, 29, 30, 31, 33, 37 e 38).

OLIVEIRA, L. **Motores síncronos na refinação em alta consistência**. 2021. LinkedIn. Post em rede profissional. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/motores-s%C3%ADncronos-na-refina%C3%A7%C3%A3o-em-alta-consist%C3%AAncia-luciano-oliveira>. (Citado na página 40).

ONS. **O Sistema em Números**. 2025. Capacidade instalada por fonte no SIN. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. (Citado 2 vezes nas páginas 2 e 17).

PALLANTLA, M. et al. Comparison and evaluation of the different brushless excitation topologies for synchronous machines—a literature survey. In: **2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020)**. IEEE, 2020. p. 1–6. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/PESGRE45664.2020.9070398>. (Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44).

Pensamento Verde. **Usina fio d'água**. s.d. Imagem utilizada na Figura 5. Disponível em: <https://www.pensamentoverde.com.br/economia-verde/usina-fio-dagua>. (Citado na página 25).

PETERKA, A. J. **Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators**. Denver, CO: U.S. Bureau of Reclamation, 1984. Engineering Monograph No. 25. (Citado na página 27).

Solar dos Pomares. **O que é usina hidrelétrica reversível**. s.d. Ilustração utilizada na Figura 7. Disponível em: <https://solardospomares.com.br/o-que-e-usina-hidroeletrica-reversivel>. (Citado na página 26).

TERMOBLOG. **Excitatriz para turbogeradores: sistema de excitação**. 2025. Disponível em: <https://termoblog.com.br/excitatriz-para-turbogeradores-sistema-de-excitacao>. (Citado na página 47).

THARME, R. E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. **River Research and Applications**, v. 19, n. 5-6, p. 397–441, 2003. (Citado na página 28).

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **EM 1110-2-1603: Hydraulic Design of Spillways**. Washington, DC, 1990. Disponível em: <https://www.publications.usace.army.mil>. (Citado na página 27).

U.S. BUREAU OF RECLAMATION. **Design of Small Dams**. 3. ed. Denver, CO: U.S. Department of the Interior, 1987. (Citado na página 27).

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Pumped Storage Hydropower**. 2024. Definição de PSH e arranjos open-/closed-loop. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/water/pumped-storage-hydropower>. (Citado na página 25).

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Hydropower Basics**. 2025. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy (EERE). Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/water/hydropower-basics>. (Citado 2 vezes nas páginas 17 e 24).

Usinas Hidrelétricas - Furnas Centrais Elétricas. s.d. Disponível em: <https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/puc_barragens_03_hidreletrica_geral_email.pdf>. (Citado na página 16).

WANG, C. et al. Experimental study on the optimal strategy for power regulation of governing system of hydropower station. **Water**, MDPI, v. 13, n. 4, p. 421, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13040421>. (Citado na página 45).

WEG S.A. **Turbinas Hidráulicas — Catálogo Institucional**. s.d. Imagem institucional de turbina em carcaça metálica (Francis/Kaplan/Pelton). Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/NR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Turbinas-Hidr%C3%A1ulicas/Turbinas-Hidr%C3%A1ulicas/p/MKT_HISA_HYDRAULIC_TURBINES>. (Citado 3 vezes nas páginas 30, 32 e 35).

WYLIE, E. B.; STREETER, V. L.; SUO, L. **Fluid Transients in Systems**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1993. (Citado na página 22).

ZHANG, T. et al. Electro-hydraulic servo-pumped active disturbance rejection control in wind turbines for enhanced safety and accuracy. **Processes**, MDPI, v. 12, n. 5, p. 908, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr12050908>. (Citado na página 46).

ZHU, S. et al. Structure and operating performance of a double electrical excitation synchronous generator with embedded brushless synchronous exciter utilizing dc-field excitation. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, IEEE, v. 37, n. 1, p. 50–64, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TEC.2021.3096991>. (Citado na página 39).