www.revistaft.com.br

Revista FT | ISSN 1678-0817 | v. 30, n. 164, 2026 | DOI: 10.69849/mj7jfn24

Energia hidrelétrica: um estudo das turbinas hidráulicas do Rio Madeira em Rondônia

Hydroelectric energy: a study of hydraulic turbines in the Madeira River in Rondônia

Eurico Evangelista Coelho Neto[1]
Raimundo Nelson Magalhães Filho[2]

RESUMO

Este artigo analisa a adequação de turbinas hidráulicas para usinas hidrelétricas instaladas em rios de baixa queda e grande vazão, tomando como referência as Usinas Hidrelétricas Santo Antônio e Jirau, localizadas no Rio Madeira, em Rondônia. O objetivo é apontar o tipo de turbina com maior adequação energética às condições hidráulicas estudadas. A pesquisa possui natureza aplicada, abordagem qualitativa e procedimento bibliográfico, complementado por análise comparativa de dados disponibilizados pelas próprias usinas e por fontes técnicas. O estudo concentra-se nas características de operação, potência instalada, quantidade de unidades geradoras, altura de queda e configuração das turbinas. Os dados reunidos mostram que Santo Antônio possui 50 unidades do tipo Bulbo, potência instalada mínima de 3.568,3 MW e energia assegurada de 2.424,2 MW médios; Jirau possui 50 unidades, capacidade instalada de 3.750 MW e potência unitária de até 75 MW. As características de baixa queda e elevada vazão do Rio Madeira são compatíveis com turbinas axiais em configuração Bulbo, derivadas do conceito Kaplan. Conclui-se que essa configuração apresenta forte adequação técnica ao cenário analisado, conciliando elevada vazão, baixa queda e redução de estruturas civis, embora a geração hidrelétrica também envolva impactos ambientais e sociais que devem ser considerados na avaliação de empreendimentos.

Palavras-chave: energia hidrelétrica; turbina Bulbo; Rio Madeira; baixa queda; grande vazão.

ABSTRACT

This article analyzes the suitability of hydraulic turbines for hydroelectric plants installed in rivers with low head and high flow, using the Santo Antônio and Jirau Hydroelectric Power Plants, located on the Madeira River in Rondônia, as references. The objective is to identify the turbine type with the greatest energy suitability for the hydraulic conditions studied. The research is applied in nature, with a qualitative approach and bibliographic procedures, complemented by comparative analysis of data provided by the plants and technical sources. The study focuses on operating characteristics, installed power, number of generating units, head and turbine configuration. The collected data indicate that Santo Antônio has 50 Bulb units, a minimum installed capacity of 3,568.3 MW and assured energy of 2,424.2 average MW; Jirau has 50 units, an installed capacity of 3,750 MW and unit power of up to 75 MW. The low-head and high-flow characteristics of the Madeira River are compatible with axial

1 Faculdade Metropolitana – Porto Velho – Rondônia – Brasil. ORCID: não informado
2 Faculdade Metropolitana – Porto Velho – Rondônia – Brasil. ORCID: não informado

turbines in Bulb configuration, derived from the Kaplan concept. It is concluded that this configuration has strong technical suitability for the analyzed scenario, combining high flow, low head and reduced civil structures, although hydroelectric generation also involves environmental and social impacts that must be considered in project assessment.

Keywords: hydroelectric energy; Bulb turbine; Madeira River; low head; high flow.

1 INTRODUÇÃO

A hidrografia brasileira apresenta ampla disponibilidade de recursos hídricos, condição que favorece a geração hidrelétrica. Segundo a EPE (2023), 62% da matriz elétrica brasileira é obtida de usinas hidrelétricas. Nesses empreendimentos, a energia cinética da água é convertida em energia mecânica pelas turbinas e, posteriormente, em energia elétrica pelos geradores acoplados (ANEEL, 2023).

No Rio Madeira, em Rondônia, destacam-se as Usinas Hidrelétricas Santo Antônio e Jirau, concebidas para aproveitar uma condição hidráulica marcada por grande vazão e baixa queda. Conforme Furnas (2022), Santo Antônio possui potência instalada mínima de 3.568,3 MW, energia assegurada de 2.424,2 MW médios e 50 turbinas do tipo Bulbo. A usina opera em sistema a fio d’água e seu reservatório alcança 421,56 km². Jirau, por sua vez, possui capacidade instalada de 3.750 MW e 50 unidades geradoras do tipo Bulbo, distribuídas em duas casas de força, com reservatório que pode alcançar 361,6 km².

A escolha do tipo de turbina constitui uma decisão técnica diretamente relacionada à queda disponível, à vazão e às condições locais. Nesse contexto, o problema de pesquisa consiste em determinar qual tipo de turbina é mais adequado para maximizar o aproveitamento energético de rios de baixa queda e grande vazão. O objetivo é apontar a solução tecnicamente mais adequada, examinando as tecnologias utilizadas, as potencialidades de geração e a eficiência das turbinas Bulbo em centrais de baixa queda.

A hipótese adotada é que a turbina Bulbo em sistema a fio d’água apresenta maior adequação para rios de grande fluxo e pouca variação de nível, devido à sua concepção para operar sob baixas quedas e elevadas vazões. A análise também considera que empreendimentos hidrelétricos, apesar da relevância energética, produzem impactos sobre fauna, flora e comunidades, o que torna necessário relacionar desempenho técnico e características do empreendimento.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A escolha de uma turbina hidráulica deve considerar o potencial hídrico e as

características do rio, especialmente vazão e queda. Em uma UHE, a energia da água é utilizada para produzir energia mecânica nas turbinas e acionar os geradores. Santo Antônio e Jirau utilizam o modelo a fio d'água, associado a reservatórios reduzidos e condições de baixa queda (Santo Antônio Energia, 2012).

Entre os principais tipos de turbinas, Costa (2009) caracteriza a Francis como versátil para ampla faixa de quedas e volumes; a Pelton como adequada a altas quedas e baixos volumes; a Kaplan como apropriada para baixas quedas e grandes volumes; e a Bulbo como semelhante à Kaplan, porém concebida para instalações de altura de queda limitada e fluxo elevado. Essa classificação permite relacionar o comportamento hidráulico do Rio Madeira à tecnologia empregada em Santo Antônio e Jirau.

As turbinas Bulbo são turbinas axiais instaladas horizontalmente e submersas, nas quais o fluxo atravessa a máquina paralelamente ao eixo. O sistema de distribuição possui palhetas móveis que controlam a vazão volumétrica fornecida à turbina (Oliveira, 2014). A configuração utilizada nas usinas estudadas corresponde a turbinas Kaplan em formato Bulbo, com pás cujo ângulo pode ser ajustado para regular o rendimento. Segundo Alexander *et al.* (2009), a seleção da turbina depende da queda e da vazão locais; no caso estudado, turbinas Bulbo são utilizadas em quedas inferiores a 20 m e fluxo elevado.

Na Usina Santo Antônio, a altura da barragem em relação às comportas chega a 18,38 m, valor compatível com a condição de baixa queda descrita no TCC. A usina possui 50 turbinas Bulbo, sendo 44 indicadas no estudo como responsáveis pelo atendimento de grande parte da demanda do Sudeste e seis destinadas a Porto Velho/RO, além da potência mínima de cerca de 3.568 MW e energia assegurada de 2.424,20 MW. Na UHE Jirau, são registradas 50 unidades, potência instalada de 3.750 MW e potência média indicada de 2.184,6 MW; o estudo também registra que o empreendimento representa 3,7% da energia hidrelétrica fornecida no Brasil nessa faixa.

Jirau está localizada no Rio Madeira, a 120 km de Porto Velho/RO, e apresenta potência unitária de até 75 MW, enquanto Santo Antônio precede com 73 MW, conforme os dados reunidos no TCC. Essas características reforçam a associação entre elevada vazão, baixa queda e uso da configuração Bulbo.

A literatura também destaca que a geração hidrelétrica produz impactos ambientais e sociais. Borges (2021) aponta impactos sobre fauna, flora e sociedade; Custódio *et al.* (2022) destacam a construção a fio d'água como uma alternativa para reduzir determinados impactos relacionados a grandes reservatórios. A Fundação CECIERJ (2012) registra debates associados à inundação de áreas, perda de biodiversidade e transferência de populações

ribeirinhas e indígenas. O TCC também menciona alterações de umidade e ciclos de chuva no entorno das barragens, conforme Raphael S. N. (2016).

Do ponto de vista econômico, Sousa (2012) relaciona o menor peso da turbina Bulbo à redução de custos de instalação e operação. Ricardo *et al.* (2007) observam que a Kaplan vertical pode exigir escavação mais extensa e estruturas de concreto, enquanto a Bulbo necessita de menos estruturas civis. Dessa forma, a escolha da Bulbo pode apresentar vantagens não apenas hidráulicas, mas também construtivas.

3 METODOLOGIA

A pesquisa é de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e procedimento bibliográfico, conforme a classificação apresentada por Gil (2002). O estudo busca explorar e descrever a adequação de turbinas hidrelétricas para rios de baixa queda e grande vazão, tomando o Rio Madeira como referência.

Foram utilizados dados de artigos, livros e fontes institucionais, incluindo informações das UHE Jirau e Santo Antônio. A análise comparativa considerou a quantidade de unidades geradoras, potência, características de queda, vazão e configuração das turbinas. Andrade (2010) é utilizado como referência metodológica para a utilização e análise de fontes na construção do estudo.

A coleta concentrou-se nas características dos locais em que as turbinas foram projetadas, considerando a baixa queda e a elevada vazão do Rio Madeira. Na etapa de análise, os dados foram relacionados ao método indicado por Miranda (2009), buscando determinar o melhor desempenho dentro das condições estudadas. Também foram considerados os critérios de geração de energia associados à Resolução Normativa ANEEL nº 1.000 (2021).

Como o TCC não apresenta uma tabela ou cálculo numérico próprio de rendimento percentual das turbinas, a conclusão de adequação energética é feita de forma comparativa, com base nas características hidráulicas e operacionais documentadas nas fontes utilizadas, sem atribuir valores de eficiência que não estejam registrados no trabalho original.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A comparação das características reunidas indica forte compatibilidade entre o regime hidráulico do Rio Madeira e a configuração de turbinas Bulbo. O principal elemento é a combinação de baixa queda e grande vazão, condição para a qual as turbinas axiais em

configuração Bulbo foram projetadas. No caso de Santo Antônio, a altura de 18,38 m registrada no estudo permanece abaixo da faixa de 20 m mencionada para aplicações Bulbo, enquanto a elevada vazão do rio permite compensar a baixa altura de queda.

Os dados das duas usinas apresentam ainda uma escala significativa de aproveitamento energético. Santo Antônio possui 50 turbinas Bulbo, potência instalada mínima de 3.568,3 MW e energia assegurada de 2.424,2 MW médios. Jirau também possui 50 unidades, com capacidade instalada de 3.750 MW e potência unitária de até 75 MW. A presença da mesma configuração tecnológica nos dois empreendimentos constitui evidência de adequação do conceito Bulbo às condições do trecho do Rio Madeira analisado.

Em Santo Antônio, as unidades estão organizadas para aproveitar o fluxo em posição horizontal, transferindo a energia mecânica da água ao gerador. Em Jirau, o mesmo princípio é empregado, reforçando a relação entre a tecnologia e as condições hidráulicas locais. A configuração Kaplan-Bulbo permite ajuste das pás e controle do rendimento em diferentes condições de operação, característica importante para uma usina submetida a variações de vazão.

Além do aspecto energético, a literatura analisada indica vantagem construtiva. A menor massa da Bulbo e a necessidade de menos estruturas civis, em comparação com determinadas soluções Kaplan verticais, podem contribuir para reduzir custos de instalação e operação (Sousa, 2012; Ricardo *et al.*, 2007). Essa vantagem ganha relevância em empreendimentos de grande porte, nos quais obras civis representam parcela importante do investimento.

Entretanto, a adequação técnica da turbina não elimina os impactos associados à própria implantação da usina. A literatura citada no TCC registra alterações sobre habitats, vegetação, fauna, comunidades ribeirinhas e populações indígenas. Assim, a escolha de uma tecnologia adequada deve ser integrada à avaliação socioambiental do empreendimento. O sistema a fio d’água pode reduzir a dimensão de reservatórios em relação a modelos convencionais, mas não elimina os impactos decorrentes da alteração do ambiente fluvial.

Dessa forma, os resultados do estudo sustentam a hipótese formulada: para as condições de baixa queda e grande vazão observadas no Rio Madeira, a turbina Bulbo apresenta elevada adequação técnica e operacional. Contudo, não é possível afirmar, a partir do TCC, um percentual de eficiência superior a outras tecnologias, pois o trabalho não apresenta ensaio ou cálculo de rendimento comparativo em valores percentuais. A conclusão é, portanto, baseada na compatibilidade entre as condições hidráulicas, a tecnologia efetivamente empregada e os dados de potência e configuração dos empreendimentos.

5 CONCLUSÃO

O estudo teve como objetivo apontar o tipo de turbina mais adequado para usinas hidrelétricas instaladas em rios de baixa queda e grande vazão, utilizando as UHE Santo Antônio e Jirau, no Rio Madeira, como referência. A análise bibliográfica e comparativa mostrou que a configuração Bulbo é fortemente compatível com as condições hidráulicas do local, principalmente pela capacidade de operar com elevada vazão e baixa queda.

Santo Antônio apresenta 50 turbinas Bulbo, potência instalada mínima de 3.568,3 MW e energia assegurada de 2.424,2 MW médios, enquanto Jirau possui 50 unidades, capacidade instalada de 3.750 MW e potência unitária de até 75 MW. Os dados analisados demonstram que a tecnologia foi empregada em larga escala nos dois empreendimentos do Rio Madeira, reforçando sua adequação ao perfil hidráulico estudado.

A configuração Bulbo também apresenta vantagens construtivas e econômicas apontadas pela literatura, especialmente pela menor necessidade de estruturas civis em comparação com determinadas configurações Kaplan. Entretanto, a geração hidrelétrica permanece associada a impactos ambientais e sociais que devem integrar a avaliação de novos empreendimentos.

Conclui-se, portanto, que a turbina Bulbo constitui a alternativa mais adequada dentro das condições analisadas no TCC. A pesquisa não permite estabelecer um percentual de eficiência superior a outras turbinas, porque não foram apresentados cálculos experimentais ou valores comparativos de rendimento; ainda assim, os dados técnicos, operacionais e hidráulicos sustentam a adequação da tecnologia ao Rio Madeira.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa ANEEL nº 1.000. 2021. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html. Acesso em: 15 abr. 2026.

ANDRADE, M. M. **Introdução à metodologia do trabalho científico**: elaboração de trabalhos na graduação. São Paulo: Atlas, 2010.

BORGES, A. L. C. **Fontes de energia**: impactos e meios legais de proteção e preservação do meio ambiente pelo direito. 2021.

CUSTÓDIO, D. *et al.* **Usinas hidrelétricas e seus impactos ambientais**. 2022.

ELETROBRAS FURNAS. Usina Hidrelétrica Santo Antônio. 2024. Disponível em: https://www.furnas.com.br/Paginas/Usina-Hidreletrica-Santo-Antonio.aspx. Acesso em: 15 abr. 2026.

FINKLER, A. *et al.* **Relação do crescimento econômico e consumo de energia elétrica**. 2016.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

MIRANDA, R. L. **Regulação técnica para se obter melhor eficiência na motorização de pequenas centrais hidrelétricas no Brasil**. 2009.

OLIVEIRA, A. A. C. **Metodologia de projeto aerodinâmico de rotores axiais e otimização da pá com base nos efeitos de sweep e dihedral**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2014.

RICARDO, C. V.; UEMORI, M.; TOMAS, L. **Aplicação de unidades bulbo e Kaplan vertical em aproveitamentos de médias potências e baixas quedas**. 2007.

SANTO ANTÔNIO ENERGIA. Tecnologia avançada. 2024a. Disponível em: https://santoantonioenergia.com.br/energia-limpa/tecnologia-avancada/. Acesso em: 15 abr. 2026.

SANTO ANTÔNIO ENERGIA. Usina em números. 2024b. Disponível em: https://santoantonioenergia.com.br/usina-em-numeros/. Acesso em: 11 abr. 2026.

SOUSA, B. S. **Projeto de perfis aerodinâmicos utilizando técnicas de otimização mono e multi objetivos**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.

SOUZA JÚNIOR, O. B. de. **Um estudo de turbinas hidráulicas**: evolução tecnológica. Campina Grande, 2014.

UHE JIRAU. A estrutura da Usina Hidrelétrica Jirau. 2024. Disponível em: https://www.jirauenergia.com.br/conheca-a-uhe/. Acesso em: 15 abr. 2026.