

Avaliação do desempenho operacional da UHE Santo Antônio no SIN após implantação: aderência ao planejamento, trajetória de licenciamento/implantação e determinantes de performance

Assessment of the operational performance of the Santo Antônio Hydroelectric Power Plant within the National Interconnected System (SIN) post-implementation: adherence to planning, licensing/implementation trajectory, and performance determinants

Ana Clara Reis Azevedo¹
Nathalia Martins da Silva Reis Pimentel²
Messias Pimentel Cantanhede³

RESUMO

A Usina Hidrelétrica de Santo Antônio é um dos principais empreendimentos de geração de energia do Brasil e desempenha papel estratégico no Sistema Interligado Nacional (SIN). Além de sua importância para o suprimento energético, sua implantação provocou transformações ambientais, sociais e econômicas na região amazônica, tornando necessária uma análise integrada desses diferentes aspectos. Este trabalho teve como objetivo analisar a implantação, a operação e o gerenciamento da UHE Santo Antônio, destacando suas características técnicas, sua integração ao SIN, os indicadores operacionais utilizados no monitoramento do empreendimento, assim como os principais impactos socioambientais decorrentes de sua implantação e operação. A pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso, desenvolvido por meio de revisão bibliográfica e análise documental, utilizando informações de órgãos oficiais, como Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE), além de documentos da concessionária Santo Antônio Energia e de estudos científicos sobre o Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira. Os resultados demonstram que a adoção do modelo de usina a fio d'água e de turbinas do tipo Bulbo possibilitou elevada capacidade de geração com menor área inundada em comparação a empreendimentos convencionais. Também foi verificada a forte influência do regime hidrológico do rio Madeira sobre a operação da usina, evidenciada durante a estiagem extrema de 2023. Conclui-se que a UHE Santo Antônio possui elevada relevância para a segurança energética nacional, porém sua sustentabilidade depende da integração entre eficiência operacional, gestão ambiental e acompanhamento contínuo dos impactos sociais e ambientais associados ao empreendimento.

Palavras-chaves: Usina Hidrelétrica de Santo Antônio; Sistema Interligado Nacional; geração hidrelétrica; monitoramento operacional; impactos socioambientais; desenvolvimento sustentável.

¹ Graduanda em Engenharia Elétrica. E-mail: anaazevedo9@gmail.com

² Engenheira Eletricista, Mestre em Ciências Ambientais e Professor Orientadora. E-mail: reispimentel.eng@gmail.com.

³ Engenheiro Eletricista, Especialista em Gerenciamento de Projetos e Professor Coorientador. E-mail: messiaspimentel.eng@gmail.com

ABSTRACT

The Santo Antônio Hydroelectric Power Plant is one of Brazil's major power generation projects and plays a strategic role in the National Interconnected System (SIN). Beyond its importance to energy supply, its implementation brought about environmental, social, and economic transformations in the Amazon region, necessitating an integrated analysis of these various aspects. This study aimed to analyze the implementation, operation, and management of the Santo Antônio plant, highlighting its technical characteristics, its integration into the SIN, the operational indicators used to monitor the project, and the key socio-environmental impacts resulting from its implementation and operation. The research was conducted as a case study using a literature review and document analysis, drawing on data from official bodies—such as the National Electric System Operator (ONS), the National Water and Basic Sanitation Agency (ANA), the National Electric Energy Agency (ANEEL), the Brazilian Institute of the Environment and Renewable Natural Resources (IBAMA), and the Energy Research Office (EPE)—as well as documents from the concessionaire Santo Antônio Energia and scientific studies on the Madeira River Hydroelectric Complex. The results demonstrate that adopting a run-of-river plant model with bulb-type turbines enabled high generation capacity with a smaller flooded area compared to conventional projects. The study also confirmed the strong influence of the Madeira River's hydrological regime on the plant's operation, a fact highlighted during the extreme drought of 2023. It is concluded that the Santo Antônio plant is highly significant for national energy security; however, its sustainability depends on integrating operational efficiency, environmental management, and continuous monitoring of the social and environmental impacts associated with the project.

Keywords: Santo Antônio Hydroelectric Power Plant; National Interconnected System; hydroelectric generation; operational monitoring; socio-environmental impacts; sustainable development.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda por energia elétrica no Brasil ao longo das últimas décadas impulsionou a necessidade de ampliação da capacidade de geração do sistema elétrico nacional. Esse cenário tornou-se ainda mais relevante após a crise energética ocorrida entre os anos de 2001 e 2002, conhecida como "apagão", que evidenciou limitações estruturais do setor elétrico brasileiro e reforçou a necessidade de aperfeiçoamento do planejamento energético de longo prazo, da expansão da infraestrutura de geração e da integração entre os diferentes agentes do setor (BRASIL, 2001; EPE, 2020).

Em resposta a esse contexto, o planejamento energético brasileiro passou a direcionar esforços para o aproveitamento dos recursos naturais disponíveis em diferentes regiões do país, especialmente aqueles relacionados ao potencial hidrelétrico. O Plano Nacional de Energia (PNE), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), passou a estabelecer diretrizes voltadas ao atendimento da crescente demanda por eletricidade, conciliando expansão da oferta, segurança energética, desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental (EPE, 2020). Nesse processo, a geração hidrelétrica manteve posição estratégica na matriz elétrica brasileira, consolidando-se como a principal fonte de geração de energia do país.

A Figura 1 traz a participação das fontes na matriz energética brasileira. Conforme o Balanço Energético Nacional 2025, a fonte hidráulica permaneceu responsável por aproximadamente 46,5% da capacidade instalada nacional em 2024, mantendo-se como a principal fonte de geração da matriz elétrica brasileira. Observa-se, simultaneamente, o crescimento de fontes renováveis complementares, como a energia solar (20,5%) e a energia eólica (12,5%), evidenciando a diversificação gradual da matriz energética nacional. Apesar desse avanço, a geração hidrelétrica continua desempenhando papel essencial para a segurança energética brasileira devido à sua elevada capacidade de geração em larga escala, flexibilidade operacional e contribuição para a estabilidade do Sistema Interligado Nacional (SIN) (EPE, 2025).

Nesse contexto, a região Amazônica passou a ocupar posição de destaque no planejamento energético nacional em razão do elevado potencial hidrelétrico de suas bacias hidrográficas. Entre elas destaca-se a Bacia do Rio Madeira, caracterizada por elevada disponibilidade hídrica, expressiva vazão e localização estratégica para integração ao Sistema Interligado Nacional. Os estudos de inventário energético desenvolvidos ao longo dos anos 2000 identificaram o elevado potencial energético dessa bacia, subsidiando a implantação do Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira, composto pelas Usinas Hidrelétricas Santo Antônio e Jirau (EPE, 2006).

A Usina Hidrelétrica Santo Antônio, localizada no município de Porto Velho, estado de Rondônia, representa um dos maiores empreendimentos hidrelétricos implantados no Brasil nas últimas décadas. Dotada de potência instalada de 3.568,3 MW, distribuída entre cinquenta unidades geradoras equipadas com turbinas do tipo Bulbo, a usina foi projetada para aproveitar as características hidrológicas específicas do rio Madeira, caracterizado por elevada vazão e baixa queda hidráulica. Essa configuração permitiu a adoção do conceito de usina a fio d'água, reduzindo significativamente a área inundada quando comparada a empreendimentos hidrelétricos convencionais de potência semelhante (FURNAS, 2024).

Além de sua relevância técnica, a UHE Santo Antônio desempenha papel estratégico para o atendimento da demanda energética nacional. Integrada ao Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira juntamente com a UHE Jirau, a usina contribui de forma significativa para o Sistema Interligado Nacional (SIN) por meio da transmissão de energia em corrente contínua de alta tensão (HVDC), conectando a região Norte ao principal centro consumidor do país. Desde o início de sua operação comercial, em 2012, o empreendimento vem apresentando elevados índices de geração, contribuindo de forma expressiva para a segurança e confiabilidade do sistema elétrico brasileiro (ONS, 2024).

Entretanto, a implantação da usina também esteve associada a importantes desafios socioambientais. Assim como outros grandes empreendimentos hidrelétricos implantados na Amazônia, a construção da UHE Santo Antônio provocou alterações significativas na dinâmica territorial da região, incluindo processos de reassentamento populacional, modificações nas atividades econômicas locais e transformações ambientais decorrentes da implantação da infraestrutura de geração. Essas questões têm sido amplamente discutidas por diversos pesquisadores, que destacam a necessidade de avaliar de forma integrada os benefícios energéticos e os impactos sociais e ambientais associados ao empreendimento (RIBEIRO; MORET, 2014; COSTA, 2018).

Embora exista ampla literatura abordando aspectos socioambientais relacionados às usinas hidrelétricas amazônicas, observa-se que grande parte dos estudos se concentra na avaliação dos impactos ambientais e sociais, havendo menor quantidade de pesquisas que integrem aspectos históricos, construtivos, operacionais, hidrológicos e estatísticos da geração de energia em um único estudo de caso. Nesse sentido, a análise integrada da UHE Santo Antônio permite compreender não apenas sua importância para a expansão do sistema elétrico brasileiro, mas também sua contribuição para o planejamento energético nacional e sua inserção no contexto do Sistema Interligado Nacional.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo analisar a Usina Hidrelétrica Santo Antônio sob a perspectiva do planejamento energético nacional, abordando seu processo de implantação, suas características técnicas, sua integração ao Sistema Interligado Nacional, seu desempenho operacional e os principais impactos socioambientais decorrentes da implantação do empreendimento.

A principal contribuição deste estudo consiste na integração de informações provenientes de documentos oficiais, literatura científica, dados operacionais do Operador Nacional do Sistema Elétrico, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e da própria concessionária da usina, permitindo construir uma análise abrangente sobre a importância estratégica da UHE Santo Antônio para o sistema elétrico brasileiro.

Este artigo está organizado em quatro seções. A primeira apresenta o contexto histórico relacionado ao planejamento, licenciamento ambiental e construção da usina. A segunda aborda suas características técnicas, descrevendo os principais componentes do empreendimento e sua integração ao Sistema Interligado Nacional. A terceira analisa o desempenho operacional da usina por meio de indicadores estatísticos e dados históricos de geração de energia. Por fim, a quarta seção discute os principais impactos socioambientais associados ao empreendimento, bem como as medidas mitigadoras e compensatórias implementadas durante sua implantação e operação.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Histórico da Usina Hidrelétrica de Santo Antônio

2.1.1 Planejamento da implantação da UHE Santo Antônio

A implantação da Usina Hidrelétrica Santo Antônio está diretamente relacionada ao processo de expansão do setor elétrico brasileiro ocorrido nas primeiras décadas do século XXI. O crescimento da demanda por energia elétrica, impulsionado pelo desenvolvimento econômico, pela expansão industrial e pelo aumento do consumo residencial, passou a exigir a ampliação da capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional (SIN), tornando o planejamento energético um elemento estratégico para garantir a segurança do suprimento de energia elétrica no país.

Esse cenário tornou-se ainda mais evidente após a crise de abastecimento registrada entre 2001 e 2002, conhecida como "apagão". A insuficiência da oferta de energia frente ao crescimento da demanda evidenciou fragilidades estruturais do sistema elétrico brasileiro e reforçou a necessidade de aperfeiçoamento

dos mecanismos de planejamento da expansão da geração e da transmissão de energia (BRASIL, 2001; EPE, 2020).

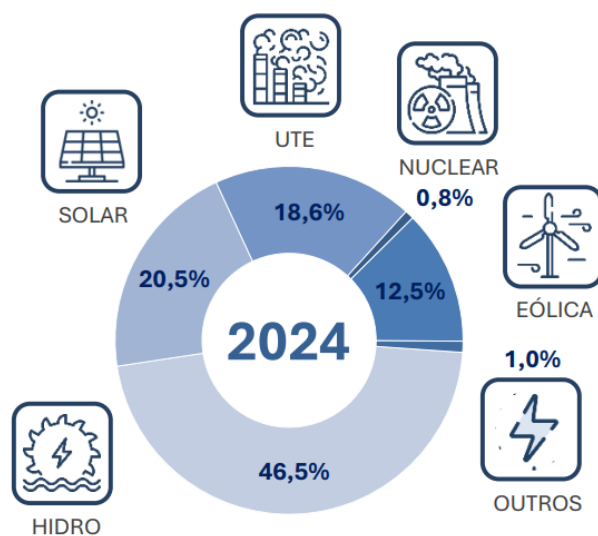
Em resposta a esse contexto, o governo federal intensificou os estudos voltados ao aproveitamento do potencial hidrelétrico nacional, priorizando regiões ainda pouco exploradas sob o ponto de vista energético. Entre essas regiões destacou-se a Bacia do Rio Madeira, localizada na Amazônia Ocidental, reconhecida por apresentar uma das maiores disponibilidades hídricas do país, elevada vazão e características hidrológicas favoráveis à implantação de usinas hidrelétricas de grande porte (EPE, 2006).

Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a Bacia do Rio Madeira possui aproximadamente 1,42 milhão de km² de área de drenagem, dos quais cerca de 43% situam-se em território brasileiro, enquanto o restante distribui-se entre Bolívia e Peru. A elevada disponibilidade hídrica da bacia, associada à vazão média de longo período superior a 34.000 m³/s, tornou a região uma das principais fronteiras de expansão da geração hidrelétrica brasileira (ANA, 2024).

Os estudos de inventário hidrelétrico desenvolvidos para a bacia identificaram condições favoráveis à implantação do Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira, composto pelas Usinas Hidrelétricas Santo Antônio e Jirau. Além do expressivo potencial energético, o empreendimento apresentava localização estratégica para integração ao Sistema Interligado Nacional por meio de linhas de transmissão em corrente contínua de alta tensão (HVDC), permitindo o escoamento da energia produzida na região Norte para os principais centros consumidores do país.

A consolidação desse planejamento ocorreu por meio do Plano Nacional de Energia (PNE), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que passou a orientar a expansão da matriz elétrica brasileira considerando critérios relacionados à segurança energética, confiabilidade do sistema, crescimento econômico e desenvolvimento sustentável (EPE, 2020). Paralelamente, o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), lançado em 2007, incorporou os empreendimentos do Rio Madeira entre seus projetos prioritários de infraestrutura, garantindo os investimentos necessários para sua implantação (PÊGO; CAMPOS NETO, 2008).

Figura 1: Participação das fontes na matriz energética brasileira.



Fonte: EPE, 2026.

Segundo Moret e Ferreira (2008), a expansão da geração hidrelétrica na Amazônia constituiu uma das principais estratégias adotadas pelo planejamento energético brasileiro para assegurar o crescimento da oferta de eletricidade. Entretanto, os autores destacam que a rapidez na implantação desses empreendimentos também intensificou discussões relacionadas aos impactos ambientais e sociais decorrentes da ocupação de regiões ambientalmente sensíveis.

Os estudos de planejamento culminaram na realização do leilão de concessão da UHE Santo Antônio em dezembro de 2007, vencido pelo Consórcio Madeira Energia S.A. (MESA). O Contrato de Concessão foi assinado em 13 de junho de 2008, estabelecendo prazo inicial de 35 anos para exploração do empreendimento. Posteriormente, esse prazo foi prorrogado em quatro anos e quatro meses, passando a vigorar até outubro de 2047, conforme estabelecido pela Lei nº 14.052/2020 e regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Sob o ponto de vista do planejamento energético, a implantação da UHE Santo Antônio representou um marco na expansão da infraestrutura elétrica brasileira. Além de ampliar significativamente a capacidade de geração do Sistema Interligado Nacional, o empreendimento consolidou o aproveitamento hidrelétrico do Rio Madeira e fortaleceu a integração elétrica entre as regiões Norte, Sudeste e Centro-Oeste, contribuindo para o aumento da confiabilidade operativa do sistema elétrico nacional.

2.1.2 Processo de licenciamento ambiental

A implantação de empreendimentos hidrelétricos de grande porte no Brasil está condicionada ao processo de licenciamento ambiental, instrumento da Política Nacional do Meio Ambiente instituída pela Lei Federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. O licenciamento constitui um dos principais mecanismos de gestão ambiental do país, tendo como finalidade compatibilizar o desenvolvimento econômico com a preservação dos recursos naturais, assegurando que atividades potencialmente causadoras de significativa degradação ambiental sejam previamente avaliadas quanto à sua viabilidade e aos impactos decorrentes de sua implantação (BRASIL, 1981).

A regulamentação desse instrumento foi posteriormente consolidada pela Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997, que estabelece os procedimentos administrativos aplicáveis ao licenciamento ambiental em âmbito nacional. Conforme essa resolução, o processo compreende três etapas sucessivas: a Licença Prévia (LP), concedida na fase de planejamento e responsável por atestar a viabilidade ambiental do empreendimento; a Licença de Instalação (LI), que autoriza o início das obras mediante o cumprimento das condicionantes estabelecidas; e a Licença de Operação (LO), emitida após a verificação do atendimento às exigências ambientais necessárias para o funcionamento da atividade (CONAMA, 1997).

Além da emissão das licenças ambientais, o processo exige a elaboração de instrumentos técnicos destinados à identificação, previsão e avaliação dos impactos ambientais decorrentes da implantação do empreendimento. Entre esses instrumentos destacam-se o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), documentos que subsidiam a análise da viabilidade ambiental, a definição das medidas mitigadoras e compensatórias e o processo de tomada de decisão pelos órgãos licenciadores.

No caso da Usina Hidrelétrica Santo Antônio, o processo de licenciamento ambiental destacou-se como um dos mais complexos já conduzidos na Amazônia brasileira, em razão da dimensão do empreendimento, da elevada sensibilidade ambiental da Bacia do Rio Madeira e da diversidade de impactos potenciais associados à implantação da usina. A condução do processo envolveu diferentes instituições governamentais, entre elas o Ministério de Minas e Energia (MME), responsável pelo planejamento energético nacional; o Ministério do Meio Ambiente (MMA); e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), responsável pela análise técnica dos estudos ambientais e pela emissão das respectivas licenças.

Durante a tramitação do licenciamento foram realizadas audiências públicas, consultas técnicas e avaliações multidisciplinares envolvendo especialistas das áreas de hidrologia, ecologia, engenharia, geologia, recursos pesqueiros e ciências sociais. Essa abordagem buscou ampliar a compreensão dos impactos ambientais e socioeconômicos decorrentes da implantação do empreendimento, subsidiando a definição das condicionantes ambientais estabelecidas para sua construção e operação.

Entre as principais condicionantes definidas pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) destacaram-se a implementação de programas de monitoramento da qualidade da água, ictiofauna, fauna terrestre, cobertura vegetal, processos hidrossedimentológicos, saúde pública, reassentamento populacional e desenvolvimento socioeconômico das comunidades atingidas. Também foram estabelecidos programas de recuperação de áreas degradadas, recomposição da vegetação, acompanhamento da migração de peixes e monitoramento permanente das condições ambientais da região, os quais passaram a integrar as obrigações assumidas pelo empreendedor durante toda a vida útil do empreendimento (IBAMA, 2008; SANTO ANTÔNIO ENERGIA, 2022).

Apesar da abrangência desses programas, diversos estudos apontam limitações relacionadas à efetividade do processo de licenciamento ambiental em grandes empreendimentos hidrelétricos implantados na Amazônia. Ribeiro e Moret (2014) argumentam que os estudos ambientais desenvolvidos para os empreendimentos do rio Madeira apresentaram limitações na previsão dos impactos sociais de longo prazo, especialmente aqueles relacionados às transformações territoriais, ao crescimento urbano e às mudanças nas condições de vida das populações atingidas.

Em perspectiva semelhante, Moret et al. (2012) afirmam que os processos de avaliação ambiental frequentemente restringem o conceito de população atingida aos indivíduos diretamente deslocados pelas obras, desconsiderando comunidades que mantêm relações econômicas, culturais e sociais com o território afetado. Costa (2018) complementa essa discussão ao destacar que grandes projetos de infraestrutura

frequentemente adotam abordagens setoriais para avaliação de impactos complexos, dificultando a compreensão integrada das transformações produzidas pelo empreendimento.

Nesse contexto, o processo de licenciamento ambiental da UHE Santo Antônio evidencia os desafios inerentes à implantação de grandes empreendimentos hidrelétricos em regiões ambientalmente sensíveis. Embora represente importante instrumento de regulação ambiental e de controle dos impactos decorrentes da atividade, sua efetividade depende da qualidade dos estudos realizados, do cumprimento das condicionantes estabelecidas e do monitoramento contínuo das medidas ambientais e sociais implementadas ao longo da operação do empreendimento.

Concluídas as etapas de licenciamento e atendidas as exigências legais estabelecidas pelos órgãos competentes, iniciou-se a fase de implantação física da UHE Santo Antônio, caracterizada por um dos maiores projetos de engenharia já executados na Amazônia brasileira.

2.1.3 Construção e implantação da Usina Hidrelétrica Santo Antônio

A implantação da Usina Hidrelétrica Santo Antônio representou um dos maiores empreendimentos de infraestrutura energética realizados no Brasil nas últimas décadas. Localizada no rio Madeira, no município de Porto Velho, estado de Rondônia, a usina integra o Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira e foi concebida como parte da estratégia nacional de expansão da capacidade de geração do Sistema Interligado Nacional (SIN). Sua construção marcou um importante avanço no aproveitamento do potencial hidrelétrico da região Norte, contribuindo para o fortalecimento da segurança energética brasileira.

O empreendimento resultou dos estudos de inventário hidrelétrico desenvolvidos para a bacia do rio Madeira ao longo dos anos 2000. Após a definição da viabilidade técnica e ambiental do projeto, o leilão de concessão para construção e operação da usina foi realizado em dezembro de 2007, sendo vencido pela Madeira Energia S.A. (MESA), sociedade constituída especificamente para implantação do empreendimento. O Contrato de Concessão foi assinado em 13 de junho de 2008, com prazo inicial de 35 anos, posteriormente prorrogado por quatro anos e quatro meses, estendendo sua vigência até outubro de 2047, conforme a Lei nº 14.052/2020.

O financiamento da obra envolveu uma estrutura composta por recursos públicos e privados, reunindo investimentos dos acionistas da MESA e financiamentos concedidos pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), pelo Fundo de Investimento do Fundo de Garantia do Tempo de Serviço (FI-FGTS) e pelo Fundo Constitucional de Financiamento do Norte (FNO). Essa estrutura financeira possibilitou a execução de um empreendimento de elevada complexidade técnica e elevado investimento inicial, característica comum aos grandes projetos hidrelétricos brasileiros.

Figura 2 – Construção da UHE Santo Antônio.



Fonte: Furnas, 2026.

As obras tiveram início em 2008 e representaram um dos maiores desafios de engenharia e logística já executados na Amazônia brasileira. A localização remota do empreendimento exigiu a implantação de ampla infraestrutura de apoio, incluindo acessos, áreas industriais, canteiros de obras, alojamentos e sistemas

de transporte capazes de atender à movimentação de equipamentos de grande porte e milhares de trabalhadores.

A magnitude da construção pode ser observada pelos volumes de materiais empregados. Foram utilizados mais de 1,1 milhão de metros cúbicos de concreto convencional na casa de força e aproximadamente 446 mil metros cúbicos de concreto compactado a rolo (CCR), tecnologia amplamente empregada em barragens devido à elevada resistência mecânica, rapidez construtiva e redução dos custos de execução. Além disso, as escavações realizadas nos canais de adução, restituição e estruturas auxiliares ultrapassaram dezenas de milhões de metros cúbicos de solo e rocha, evidenciando a complexidade técnica da implantação (FURNAS, 2024b; SAE, 2020).

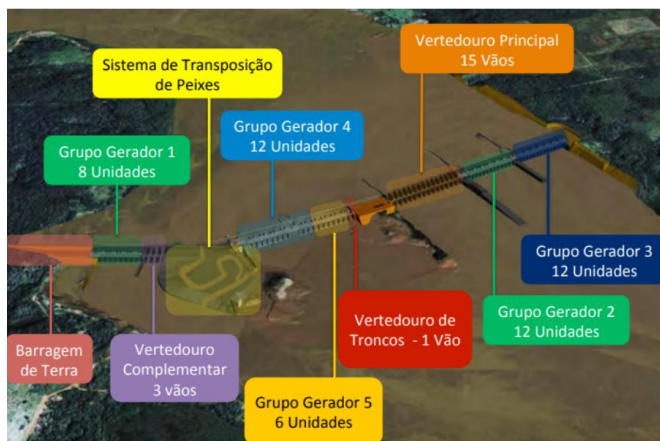
A barragem principal foi construída utilizando estruturas de concreto compactado a rolo associadas a barragens de terra, atingindo altura máxima de aproximadamente 44,5 metros, como mostra a Figura 2. Embora presente dimensões inferiores às observadas em grandes barragens de acumulação, essa configuração mostrou-se adequada às características hidráulicas do rio Madeira, permitindo elevada capacidade de geração com reduzida formação de reservatório.

Durante a fase de implantação, Porto Velho experimentou profundas transformações econômicas, demográficas e urbanas. O aumento expressivo da população, da demanda por serviços públicos e da atividade econômica esteve diretamente relacionado às obras das usinas Santo Antônio e Jirau, alterando significativamente a dinâmica regional (NOGUEIRA, 2017; RIBEIRO; MORET, 2014).

Além da magnitude das obras civis, a UHE Santo Antônio incorporou soluções tecnológicas inovadoras para o aproveitamento energético de rios de elevada vazão e baixa queda hidráulica. O empreendimento foi concebido segundo o modelo de usina a fio d'água, associado à utilização de turbinas do tipo Bulbo, permitindo elevado aproveitamento energético com menor área inundada quando comparado às hidrelétricas convencionais de potência semelhante.

A Figura 3 apresenta a configuração geral das principais estruturas do empreendimento, evidenciando a distribuição dos cinco grupos geradores, dos vertedouros principal e complementar, da barragem de terra e do Sistema de Transposição de Peixes (STP). A disposição linear dessas estruturas acompanha o eixo do rio Madeira, permitindo otimizar o aproveitamento hidráulico, reduzir perdas energéticas e atender simultaneamente aos requisitos operacionais e ambientais estabelecidos durante o processo de licenciamento.

Figura 3: Vista geral das estruturas da UHE Santo Antônio.



Fonte: GAMBETTI, 2015.

A elevada eficiência do projeto pode ser observada quando comparada a outras hidrelétricas brasileiras de potência semelhante. Enquanto a UHE Santo Antônio possui potência instalada de 3.568 MW e reservatório de aproximadamente 546 km², a UHE Ilha Solteira apresenta potência instalada de 3.444 MW e área inundada de cerca de 1.195 km². De forma semelhante, a UHE Itumbiara opera com 2.082 MW e reservatório de aproximadamente 778 km². Essa comparação demonstra que a adoção do conceito de usina a fio d'água permitiu alcançar elevada capacidade instalada com menor área alagada por megawatt instalado, constituindo uma das principais vantagens ambientais e operacionais do empreendimento (FURNAS, 2025; EPE, 2025).

A primeira unidade geradora entrou em operação comercial em março de 2012, aproximadamente nove meses antes do prazo originalmente previsto no cronograma de implantação. A antecipação contribuiu para ampliar a oferta de energia ao Sistema Interligado Nacional em um período de crescimento da demanda elétrica. Em janeiro de 2017, todas as cinquenta unidades geradoras já se encontravam em operação comercial, totalizando 3.568 MW de potência instalada e garantia física próxima de 2.313 MW médios.

Além de sua relevância técnica, a UHE Santo Antônio assumiu posição estratégica no mercado brasileiro de energia elétrica. A comercialização da energia produzida foi estruturada por meio de contratos firmados tanto no Ambiente de Contratação Regulada (ACR) quanto no Ambiente de Contratação Livre (ACL), permitindo equilibrar previsibilidade de receita com maior flexibilidade comercial e reduzindo a exposição do empreendimento às oscilações do mercado de energia.

Ao final de aproximadamente oito anos de construção, a UHE Santo Antônio consolidou-se como um dos principais empreendimentos hidrelétricos do país. Sua importância ultrapassa a elevada capacidade de geração, abrangendo também a adoção de soluções tecnológicas inovadoras, a integração ao Sistema Interligado Nacional e as profundas transformações econômicas, territoriais e socioambientais produzidas na região amazônica. Conforme destaca Nogueira (2017), os efeitos decorrentes da implantação de grandes hidrelétricas transcendem as alterações físicas do território, influenciando aspectos sociais, culturais, econômicos e identitários das populações envolvidas. Dessa forma, compreender o processo de construção da UHE Santo Antônio constitui etapa fundamental para analisar sua contribuição ao planejamento energético brasileiro e sua relevância no contexto do desenvolvimento do setor elétrico nacional.

2.2 Operação da Usina Hidrelétrica de Santo Antônio

2.2.1 Características técnicas do empreendimento

A operação da Usina Hidrelétrica Santo Antônio está diretamente relacionada às características hidrológicas do rio Madeira e às soluções tecnológicas adotadas para o aproveitamento de seu potencial energético. Diferentemente das hidrelétricas convencionais implantadas em rios de elevada queda hidráulica, o empreendimento foi concebido para operar em um ambiente caracterizado por grandes vazões e pequenos desníveis naturais, condição que exigiu o desenvolvimento de soluções específicas de engenharia hidráulica, estrutural e eletromecânica.

O rio Madeira constitui um dos principais tributários da Bacia Amazônica e apresenta um dos maiores regimes hidrológicos da América do Sul. Sua elevada vazão, associada à reduzida queda hidráulica e à intensa variabilidade sazonal provocada pelo regime de chuvas amazônico e pelo degelo das regiões andinas, influencia diretamente o comportamento operacional da usina. Durante os períodos de cheia, o rio transporta grandes volumes de sedimentos, troncos e materiais vegetais, impondo condições severas de operação às estruturas hidráulicas e aos equipamentos eletromecânicos. Em contrapartida, durante os períodos de estiagem, a redução da vazão disponível pode limitar a geração de energia, exigindo monitoramento contínuo das condições hidrológicas e coordenação operacional entre a concessionária e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Essas características diferenciam significativamente a UHE Santo Antônio de grande parte das hidrelétricas brasileiras. Enquanto empreendimentos instalados em rios de elevada queda utilizam reservatórios de acumulação para regularizar a vazão e garantir geração praticamente constante ao longo do ano, a UHE Santo Antônio opera segundo o conceito de usina a fio d'água, no qual a produção de energia depende predominantemente da vazão natural do rio. Nessa configuração, a água afluente permanece reduzido intervalo de tempo no reservatório antes de ser conduzida às unidades geradoras e devolvida ao curso natural do rio.

A adoção desse conceito permitiu compatibilizar elevada capacidade instalada com redução significativa da área inundada quando comparada às usinas convencionais de acumulação. Essa solução representa uma das principais características técnicas do empreendimento, reduzindo os impactos decorrentes da formação de grandes reservatórios e preservando, em maior grau, a dinâmica hidrológica natural do rio Madeira. Por outro lado, essa configuração torna a geração mais sensível às oscilações naturais de vazão, especialmente durante eventos extremos de seca, como os registrados em 2023 e 2024, quando a operação da usina precisou ser ajustada em função da disponibilidade hídrica.

Sob o ponto de vista construtivo, a UHE Santo Antônio foi concebida como um sistema integrado composto por barragens, vertedouros, casas de força, unidades geradoras e Sistema de Transposição de Peixes (STP), estruturas que atuam de forma coordenada para garantir a conversão da energia potencial da água em energia elétrica com elevados níveis de eficiência e segurança operacional.

A Figura 3 apresenta a configuração geral do empreendimento, evidenciando a distribuição das principais estruturas hidráulicas e eletromecânicas da usina. Observa-se a disposição dos cinco grupos

geradores ao longo do eixo da barragem, do vertedouro principal, do vertedouro complementar, do vertedouro de troncos, da barragem de terra e do Sistema de Transposição de Peixes (STP). A organização dessas estruturas foi definida de forma a otimizar o aproveitamento hidráulico do rio Madeira, garantindo elevada eficiência energética, segurança operacional e atendimento às condicionantes ambientais estabelecidas durante o processo de licenciamento.

Nos tópicos seguintes são apresentados, de forma detalhada, os principais componentes estruturais responsáveis pelo funcionamento da UHE Santo Antônio, destacando suas características construtivas, funções operacionais e importância para a geração de energia elétrica.

2.2.1.1 Barragem e reservatório

A barragem da UHE Santo Antônio constitui o principal elemento responsável pelo aproveitamento hidráulico do rio Madeira, desempenhando papel essencial na criação da carga hidráulica necessária ao funcionamento das unidades geradoras. Diferentemente das barragens construídas para grandes reservatórios de acumulação, sua função principal não consiste no armazenamento de grandes volumes de água, mas na elevação controlada do nível do rio, permitindo direcionar a vazão para as casas de força e garantir condições adequadas de operação das turbinas Bulbo.

Essa concepção decorre diretamente das características hidrológicas do rio Madeira, cuja elevada vazão e reduzida queda natural inviabilizam soluções convencionais baseadas em grandes reservatórios. Além disso, o rio apresenta elevada variabilidade sazonal, influenciada pelo regime de chuvas da Amazônia e pelo degelo da Cordilheira dos Andes, resultando em significativas oscilações de vazão ao longo do ano. Durante os períodos de cheia, grandes volumes de sedimentos, troncos e materiais vegetais são transportados pela correnteza, impondo elevadas solicitações às estruturas hidráulicas do empreendimento.

Para atender a essas condições, a barragem foi projetada utilizando estruturas de concreto compactado a rolo (CCR) associadas a barragens de terra compactada, solução amplamente empregada em grandes empreendimentos hidrelétricos devido à elevada resistência mecânica, rapidez construtiva, durabilidade e redução dos custos de execução. A estrutura principal apresenta altura máxima aproximada de 44,5 metros, distribuída entre diferentes segmentos implantados nas margens e no leito do rio, formando um sistema integrado capaz de suportar as elevadas vazões características da bacia do Madeira.

Além de sustentar as estruturas da usina, a barragem exerce papel fundamental no controle hidráulico do empreendimento, permitindo a adequada condução da vazão para as unidades geradoras e para os vertedouros. Entretanto, por se tratar de uma usina do tipo fio d'água, sua capacidade de regularização é bastante limitada. A geração de energia depende predominantemente da vazão natural do rio, tornando a operação mais sensível às condições hidrológicas observadas na bacia. Eventos extremos de estiagem, como os registrados em 2023 e 2024, reduziram significativamente a disponibilidade hídrica da região Norte e exigiram acompanhamento permanente das condições de vazão pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), bem como adequações operacionais por parte da concessionária para garantir a segurança do empreendimento e a continuidade do atendimento ao Sistema Interligado Nacional.

O reservatório da UHE Santo Antônio foi concebido segundo o conceito de usina a fio d'água, caracterizando-se pelo reduzido tempo de retenção da água antes de sua restituição ao curso natural do rio. Essa configuração minimiza alterações na dinâmica hidrológica quando comparada às usinas convencionais de acumulação, ao mesmo tempo em que reduz significativamente a área inundada por unidade de energia gerada.

Com área aproximada de 546 km², profundidade média de 11,5 metros e vida útil estimada superior a cem anos, o reservatório desempenha função essencial para a estabilidade operacional do empreendimento. Entretanto, sua reduzida capacidade de armazenamento implica menor capacidade de regularização das vazões, reforçando a necessidade de monitoramento hidrológico contínuo e planejamento operacional integrado entre a concessionária e o Operador Nacional do Sistema Elétrico.

Figura 4: Barragem.



Fonte: Santo Antônio Energia, 2026.

2.2.1.2 Vertedouro principal da UHE Santo Antônio

O vertedouro constitui uma das estruturas hidráulicas mais importantes da UHE Santo Antônio, sendo responsável pelo controle das vazões excedentes do rio Madeira e pela preservação da segurança estrutural da barragem durante períodos de elevada disponibilidade hídrica. Sua principal função consiste em permitir a passagem controlada da água que excede a capacidade de turbinamento das unidades geradoras, evitando que o nível do reservatório ultrapasse os limites operacionais estabelecidos para o empreendimento.

Em usinas hidrelétricas do tipo fio d'água, como a UHE Santo Antônio, o vertedouro assume papel ainda mais relevante, uma vez que a reduzida capacidade de armazenamento do reservatório limita significativamente a regularização das vazões naturais do rio. Dessa forma, durante o período chuvoso, praticamente toda a água afluente que não é utilizada na geração de energia precisa ser descarregada de forma segura por meio do sistema de vertimento.

O sistema de vertedouros da UHE Santo Antônio foi dimensionado para operar sob as severas condições hidrológicas do rio Madeira, cuja vazão pode apresentar grandes oscilações ao longo do ano. O empreendimento dispõe de vertedouro principal, vertedouro complementar e vertedouro de troncos, estruturas que atuam de forma integrada para garantir o escoamento das vazões excedentes e dos materiais flutuantes transportados pelo rio, como troncos, galhos e resíduos vegetais, reduzindo riscos de obstrução das tomadas d'água e das unidades geradoras.

As comportas do vertedouro são operadas de acordo com procedimentos técnicos previamente estabelecidos, considerando informações provenientes do monitoramento hidrológico, previsões meteorológicas, níveis do reservatório e orientações operativas emitidas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Essa operação busca manter o equilíbrio entre a maximização da geração de energia, a segurança das estruturas hidráulicas e a preservação das condições naturais do rio Madeira.

A elevada capacidade de descarga do vertedouro constitui requisito essencial para empreendimentos instalados em rios de grande vazão, como o Madeira. Durante os períodos de cheia, quando a vazão afluente supera significativamente a capacidade de turbinamento da usina, o vertimento controlado torna-se indispensável para evitar sobrecargas hidráulicas sobre a barragem e garantir a integridade estrutural do empreendimento.

Por outro lado, em situações de restrição hídrica, como as observadas durante as estiagens extremas de 2023 e 2024, a operação do vertedouro é significativamente reduzida, uma vez que praticamente toda a vazão disponível passa a ser direcionada prioritariamente para as unidades geradoras. Nessas condições, o gerenciamento operacional torna-se ainda mais complexo, exigindo acompanhamento contínuo das condições hidrológicas e permanente coordenação entre a concessionária, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), de forma a garantir o uso eficiente da disponibilidade hídrica sem comprometer a segurança operacional da usina.

A Figura 4 apresenta uma vista geral da barragem e do reservatório da UHE Santo Antônio. Observa-se a reduzida extensão longitudinal do espelho d'água quando comparada às hidrelétricas convencionais de acumulação, característica diretamente associada ao conceito de usina a fio d'água adotado no empreendimento. Essa configuração permitiu compatibilizar elevada capacidade instalada com menor área

inundada, reduzindo impactos ambientais relacionados à formação de grandes reservatórios, embora aumente a dependência das condições hidrológicas naturais do rio Madeira para manutenção da geração de energia.

Figura 5: Vertedouro Principal.



Fonte: Santo Antônio Energia, 2026.

A Figura 5 apresenta o vertedouro principal da UHE Santo Antônio durante operação. Observa-se a disposição das comportas responsáveis pelo controle das descargas hidráulicas e a elevada capacidade de escoamento da estrutura, compatível com as grandes vazões características do rio Madeira. Além de garantir a segurança da barragem durante eventos hidrológicos extremos, o vertedouro desempenha papel fundamental na manutenção do equilíbrio hidráulico do empreendimento, permitindo que a operação das unidades geradoras ocorra dentro dos limites operacionais estabelecidos pelo projeto.

Sob a perspectiva operacional, o sistema de vertimento da UHE Santo Antônio evidencia que a eficiência de um empreendimento hidrelétrico não depende exclusivamente da capacidade instalada das unidades geradoras, mas também da integração entre suas estruturas hidráulicas e dos sistemas de monitoramento e controle utilizados durante a operação. Dessa forma, o vertedouro constitui elemento indispensável para assegurar a confiabilidade operacional da usina e a continuidade do fornecimento de energia ao Sistema Interligado Nacional.

2.2.1.3 Casa de força e unidades geradoras

A casa de força constitui o principal núcleo operacional da UHE Santo Antônio, concentrando os equipamentos responsáveis pela conversão da energia hidráulica do rio Madeira em energia elétrica. Nessa estrutura encontram-se instaladas as turbinas hidráulicas, os geradores síncronos e os sistemas auxiliares de controle, proteção, lubrificação, refrigeração e supervisão, formando o conjunto eletromecânico responsável pelo funcionamento do empreendimento.

O processo de geração inicia-se com a condução da vazão do rio Madeira até as tomadas d'água da usina. Ao atravessar as turbinas hidráulicas, a energia potencial e cinética da água é convertida em energia mecânica de rotação. Esse movimento é transmitido diretamente ao eixo do gerador síncrono, responsável por transformar a energia mecânica em energia elétrica por meio do princípio da indução eletromagnética. Após acionar as turbinas, a água é restituída ao leito natural do rio pelos canais de restituição, caracterizando o funcionamento típico de uma usina hidrelétrica do tipo fio d'água.

A UHE Santo Antônio possui cinquenta unidades geradoras distribuídas ao longo da casa de força principal, totalizando potência instalada de 3.568 MW. A disposição das unidades foi definida de forma a otimizar o aproveitamento da largura do rio Madeira e distribuir adequadamente as vazões afluentes entre as turbinas, garantindo elevada eficiência hidráulica e segurança operacional.

A utilização de cinquenta unidades geradoras representa uma importante característica operacional do empreendimento. Além de possibilitar maior flexibilidade no despacho da geração, essa configuração aumenta a confiabilidade da usina, permitindo que unidades individuais sejam retiradas de operação para inspeções ou manutenções preventivas sem comprometer significativamente a disponibilidade global do sistema de geração. Essa modularização também possibilita adequar continuamente o número de unidades em operação às

condições hidrológicas do rio Madeira, contribuindo para o melhor aproveitamento da vazão disponível ao longo do ano.

Outro aspecto relevante refere-se ao elevado grau de automação empregado na operação da casa de força. Cada unidade geradora é monitorada continuamente por sistemas supervisórios responsáveis pelo acompanhamento de variáveis operacionais, como potência gerada, vazão turbinada, tensão, frequência, temperatura dos mancais, vibração dos equipamentos e condições de funcionamento das turbinas e geradores. Essas informações são processadas em tempo real pelo Centro de Operação da usina e compartilhadas com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), permitindo o acompanhamento permanente da disponibilidade operacional do empreendimento e subsidiando as decisões relacionadas ao despacho da geração elétrica.

Sob o ponto de vista da engenharia, a casa de força representa o elo entre as estruturas hidráulicas e o sistema eletromecânico da usina. Enquanto a barragem e os vertedouros controlam o comportamento hidráulico do rio Madeira, é na casa de força que ocorre efetivamente a conversão da energia hidráulica em energia elétrica. Dessa forma, seu desempenho influencia diretamente a eficiência operacional do empreendimento, a confiabilidade do fornecimento de energia e a capacidade da UHE Santo Antônio de atender às demandas do Sistema Interligado Nacional (SIN).

A concepção da casa de força, associada ao elevado número de unidades geradoras e aos modernos sistemas de automação e supervisão, confere elevada flexibilidade operacional ao empreendimento. Essas características permitem que a usina responda rapidamente às variações de vazão do rio Madeira e às solicitações operativas do ONS, assegurando elevados índices de disponibilidade e contribuindo para a confiabilidade do sistema elétrico brasileiro.

2.2.1.4 Turbinas Bulbo e geradores síncronos

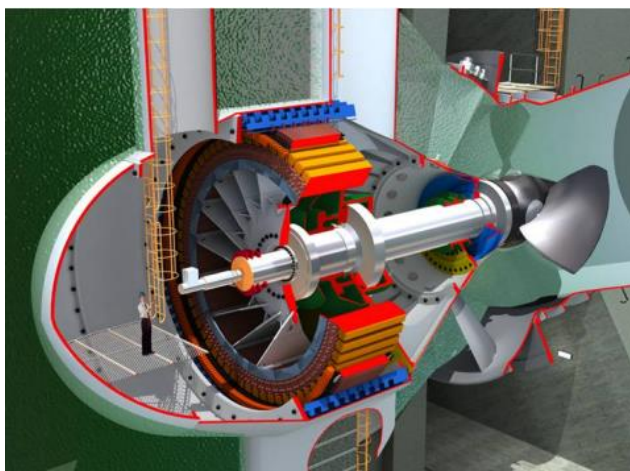
A conversão da energia hidráulica em energia elétrica na UHE Santo Antônio é realizada por um conjunto de turbinas hidráulicas do tipo Bulbo acopladas a geradores síncronos de grande porte. A adoção dessa tecnologia representa um dos principais diferenciais do empreendimento, uma vez que as turbinas Bulbo são especialmente desenvolvidas para aproveitamentos hidrelétricos caracterizados por grandes vazões e baixas quedas hidráulicas, condições predominantes no rio Madeira. Diferentemente das turbinas Francis, utilizadas em usinas implantadas em rios de média e alta queda, as turbinas Bulbo possuem eixo horizontal e o gerador elétrico instalado no interior de um compartimento estanque em formato cilíndrico, denominado bulbo, localizado diretamente no eixo do escoamento da água. Essa configuração reduz perdas hidráulicas decorrentes das mudanças de direção do fluxo, melhora o aproveitamento energético da vazão disponível e proporciona elevados rendimentos operacionais mesmo em rios de planície.

A escolha dessa tecnologia está diretamente relacionada às características hidrológicas do rio Madeira. Enquanto usinas convencionais dependem da formação de grandes reservatórios para obtenção de elevadas quedas hidráulicas, a UHE Santo Antônio utiliza predominantemente a energia associada ao grande volume de água transportado pelo rio. Dessa forma, a adoção das turbinas Bulbo permitiu compatibilizar elevada capacidade instalada com reduzida área inundada, constituindo uma solução de engenharia adequada às condições naturais da região.

As cinquenta unidades geradoras instaladas na UHE Santo Antônio figuram entre as maiores turbinas Bulbo em operação no mundo. Cada equipamento possui aproximadamente quinze metros de comprimento, oito metros de diâmetro e massa próxima de novecentas toneladas. Das cinquenta unidades instaladas, vinte e quatro utilizam turbinas de quatro pás com potência nominal de 73,29 MW, enquanto vinte e seis empregam turbinas de cinco pás com potência nominal de 69,59 MW, permitindo otimizar o desempenho hidráulico em diferentes condições de operação.

O principal componente hidráulico dessas máquinas é o rotor Kaplan, responsável pela conversão da energia potencial e cinética da água em energia mecânica de rotação. Na UHE Santo Antônio, cada rotor apresenta aproximadamente 7,5 metros de diâmetro e massa superior a 115 toneladas. As pás móveis possuem ajuste angular automático, permitindo que a turbina opere continuamente próxima ao ponto de máximo rendimento, mesmo diante das variações de vazão e dos níveis hidráulicos observados ao longo do ano. Essa característica representa uma das principais vantagens operacionais da tecnologia Bulbo e contribui significativamente para a elevada eficiência energética do empreendimento.

Figura 6: Turbina tipo Bulbo



Fonte: Santo Antônio Energia, 2026.

A Figura 6 apresenta a configuração interna da turbina Bulbo utilizada na UHE Santo Antônio. Observa-se que o gerador síncrono se encontra instalado no interior do compartimento cilíndrico (bulbo), enquanto o rotor Kaplan está posicionado imediatamente a jusante. Essa disposição permite reduzir perdas hidráulicas, melhorar o escoamento da água através da máquina e elevar a eficiência da conversão energética, constituindo uma das principais inovações empregadas no empreendimento.

Associados às turbinas encontram-se os geradores síncronos, responsáveis pela conversão da energia mecânica em energia elétrica. Cada unidade opera sincronizada à frequência de 60 Hz do Sistema Interligado Nacional, apresentando tensão nominal de 13,8 kV, capacidade de 82,25 MVA, fator de potência de 0,9 e rendimento máximo de 98,19%, evidenciando o elevado desempenho eletromecânico do conjunto gerador.

Tabela 1: Principais características eletromecânicas da UHE Santo Antônio

Característica	Valor
Potência Instalada	3.568,3 MW
Energia Assegurada	2.424,2 MW médios
Número de Turbinas	50
Tipo de Turbina	Bulbo com rotor Kaplan
Potência por unidade	69,59 MW a 73,29 MW
Frequência	60 Hz
Tensão nominal	13,8 kV
Capacidade dos geradores	82,25 MVA
Fator de potência	0,9
Rendimento máximo	98,19%

Fonte: Autoria própria.

A análise da Tabela 1 evidencia a elevada capacidade tecnológica instalada na UHE Santo Antônio. A distribuição da potência entre cinquenta unidades geradoras proporciona elevada flexibilidade operacional, permitindo adequar continuamente o número de turbinas em funcionamento às condições hidrológicas do rio Madeira e às necessidades de despacho definidas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico. Além disso, o rendimento máximo de 98,19% demonstra que as perdas eletromecânicas do conjunto turbina-gerador são reduzidas, contribuindo para o elevado desempenho energético do empreendimento.

Sob o ponto de vista da engenharia, a utilização das turbinas Bulbo associada ao conceito de usina a fio d'água representa uma solução tecnológica especialmente desenvolvida para rios de elevada vazão e baixa queda hidráulica. Essa configuração permitiu compatibilizar elevada eficiência energética, reduzida área inundada e elevada confiabilidade operacional, transformando a UHE Santo Antônio em uma referência internacional na aplicação dessa tecnologia em grandes aproveitamentos hidrelétricos.

2.2.2 Integração ao Sistema Interligado Nacional (SIN)

A operação de grandes usinas hidrelétricas está diretamente relacionada à capacidade do sistema elétrico de transportar a energia gerada até os centros consumidores de forma segura, confiável e economicamente eficiente. No Brasil, essa função é desempenhada pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), uma extensa infraestrutura composta por usinas geradoras, linhas de transmissão, subestações e centros de operação, que permite o intercâmbio contínuo de energia entre os diferentes subsistemas elétricos do país.

Consolidado a partir das reformas do setor elétrico brasileiro ocorridas na década de 1990, o SIN passou a integrar sistemas regionais anteriormente operados de forma independente. A criação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), regulamentada pela Resolução ANEEL nº 351/1998, representou um marco nesse processo ao estabelecer uma coordenação única para a operação da geração e da transmissão de energia elétrica em âmbito nacional. Atualmente, o SIN reúne usinas hidrelétricas, termelétricas, eólicas, solares e nucleares distribuídas pelos subsistemas Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul, permitindo o intercâmbio de energia entre regiões com diferentes características hidrológicas e perfis de consumo (ANEEL, 1998; ONS, 2024).

Essa configuração torna o sistema elétrico brasileiro um dos maiores sistemas interligados do mundo, permitindo que excedentes de geração produzidos em uma região sejam direcionados para localidades onde a demanda é mais elevada. Além de aumentar a confiabilidade do suprimento de energia, essa integração reduz os efeitos da sazonalidade hidrológica e favorece o aproveitamento complementar das diferentes fontes de geração disponíveis na matriz elétrica brasileira.

Figura 7: Sistema Interligado Nacional (SIN).



Fonte: AXIA, 2026.

A Figura 7 apresenta a configuração da malha de transmissão do Sistema Interligado Nacional, evidenciando a elevada densidade de linhas de transmissão nas regiões Sudeste, Sul e Nordeste e os corredores de transmissão responsáveis pela integração da região Norte aos principais centros consumidores do país. Destaca-se o sistema de transmissão em corrente contínua (HVDC) que conecta Porto Velho (RO) à subestação de Araraquara (SP), permitindo o escoamento da energia produzida pelas usinas do Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira.

Nesse contexto, a UHE Santo Antônio desempenha papel estratégico para o abastecimento energético nacional. Localizada no rio Madeira, no estado de Rondônia, a usina integra, juntamente com a UHE Jirau, o Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira, formando um dos maiores polos de geração hidrelétrica do país. Em conjunto, os dois empreendimentos totalizam potência instalada superior a 7.300 MW, correspondendo a aproximadamente 6,7% da capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional, evidenciando sua contribuição para a segurança energética brasileira (ANA, 2025).

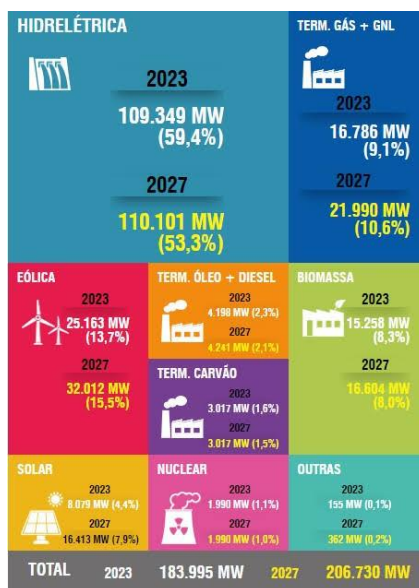
A energia produzida pelo complexo é transmitida por meio de duas linhas de transmissão em corrente contínua de alta tensão (HVDC), operando em ± 600 kV e com aproximadamente 2.375 quilômetros de extensão entre Porto Velho (RO) e Araraquara (SP). A adoção da tecnologia HVDC deve-se à elevada eficiência na transmissão de grandes blocos de potência em longas distâncias, reduzindo perdas elétricas quando comparada aos sistemas convencionais em corrente alternada. Essa infraestrutura constitui um dos maiores sistemas de transmissão em corrente contínua do mundo e foi determinante para viabilizar o aproveitamento do potencial hidrelétrico da Amazônia (ONS, 2025).

Além da transmissão em longa distância, parte da capacidade instalada da UHE Santo Antônio exerce função estratégica para o atendimento da região Norte. Das cinquenta unidades geradoras instaladas, quarenta e quatro destinam-se ao fornecimento de energia ao Sistema Interligado Nacional, enquanto seis unidades permanecem dedicadas ao abastecimento dos estados de Rondônia e Acre. Essa configuração aumenta a confiabilidade do suprimento regional e reduz a necessidade de utilização de usinas termelétricas para atendimento da demanda local.

A integração promovida pelo SIN também possibilita maior complementaridade entre as diferentes fontes renováveis de geração. Enquanto a produção eólica e solar apresenta elevada variabilidade em função das condições climáticas, a geração hidrelétrica oferece maior flexibilidade operacional, permitindo compensar oscilações instantâneas dessas fontes por meio do despacho coordenado realizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico. Dessa forma, usinas como Santo Antônio desempenham papel fundamental na estabilidade operativa do sistema elétrico brasileiro.

Conforme apresentado na Figura 8, observa-se que, embora a participação relativa da fonte hidrelétrica apresente tendência de redução entre 2024 e 2028 (de 47,8% para 43,3%), essa fonte permanece como a principal componente da matriz elétrica nacional em termos de capacidade instalada. Simultaneamente, verifica-se expressivo crescimento das fontes solar e eólica, refletindo o processo de diversificação da matriz elétrica brasileira. Nesse cenário, a operação integrada proporcionada pelo SIN torna-se ainda mais relevante, pois permite explorar a complementaridade entre diferentes tecnologias de geração, assegurando maior confiabilidade e flexibilidade ao sistema elétrico nacional.

Figura 8: Evolução da capacidade instalada do SIN.



Fonte: ONS, 2026.

Sob a perspectiva do planejamento energético, a UHE Santo Antônio ultrapassa a condição de empreendimento exclusivamente gerador de energia. Sua elevada capacidade instalada, associada ao sistema de transmissão HVDC e à integração ao Sistema Interligado Nacional, faz da usina um elemento estratégico para o equilíbrio entre oferta e demanda de energia elétrica no Brasil. Dessa forma, o empreendimento contribui não apenas para o atendimento dos principais centros consumidores do país, mas também para a confiabilidade operativa do SIN e para a consolidação de uma matriz elétrica predominantemente renovável.

2.2.3. Indicadores operacionais e métodos de avaliação

A operação de empreendimentos hidrelétricos de grande porte exige o acompanhamento contínuo de indicadores capazes de avaliar o desempenho energético, a disponibilidade dos equipamentos, a eficiência operacional e as condições hidrológicas que influenciam diretamente a geração de energia elétrica. Esses indicadores constituem ferramentas fundamentais para o gerenciamento técnico da usina, permitindo identificar tendências operacionais, programar intervenções de manutenção e subsidiar decisões relacionadas ao despacho da geração no Sistema Interligado Nacional (SIN).

No setor elétrico brasileiro, o monitoramento desses parâmetros é realizado de forma integrada pelas concessionárias de geração, pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Enquanto as concessionárias realizam a aquisição contínua de dados por meio dos sistemas supervisórios instalados nas unidades geradoras, o ONS utiliza essas informações para acompanhar a disponibilidade operacional das usinas, elaborar estudos de planejamento energético e coordenar o despacho da geração em escala nacional. Paralelamente, a ANEEL utiliza parte desses indicadores para fiscalização do desempenho técnico dos empreendimentos e verificação do cumprimento dos requisitos regulatórios.

Os indicadores operacionais empregados na avaliação de usinas hidrelétricas abrangem aspectos relacionados à capacidade instalada, geração efetiva de energia, disponibilidade operacional, comportamento hidrológico, rendimento eletromecânico e garantia física do empreendimento. Em conjunto, esses parâmetros permitem avaliar não apenas a eficiência da conversão da energia hidráulica em energia elétrica, mas também a confiabilidade da operação e a contribuição da usina para o atendimento das demandas do Sistema Interligado Nacional.

A tabela 2 apresenta os principais indicadores utilizados na avaliação operacional da UHE Santo Antônio, destacando sua definição conceitual, unidade de medida, método de cálculo e aplicação prática no contexto do empreendimento.

Tabela 2: Principais indicadores operacionais utilizados na UHE Santo Antônio

Indicador	Descrição Conceitual	Unidade	Método de Cálculo	Aplicação na UHE Santo Antônio
Potência Instalada	Capacidade máxima de geração da usina quando todas as unidades geradoras operam em	MW	Soma das potências nominais das unidades geradoras.	3.568,3 MW, distribuídos em 50 unidades geradoras do tipo Bulbo.
Energia Gerada	Quantidade efetiva de energia produzida em determinado período.	MWh ou GWh	Medição realizada pelos sistemas de supervisão e	Geração média anual próxima de 16,9 TWh, variando conforme as
Fator de Capacidade	Relação entre a energia efetivamente gerada e a energia máxima que poderia ser produzida	%	$FC = \text{Energia Gerada} \div (\text{Potência Instalada} \times \text{Tempo})$.	Valor médio aproximado de 54%, indicando elevado aproveitamento energético para uma usina a fio
Disponibilidade e Operacional	Percentual do tempo em que as unidades geradoras	%	$\text{Horas Disponíveis} \div \text{Horas Totais}$.	Mantida por meio de programas de manutenção
Vazão Afluentes	Volume de água que chega ao reservatório ou à tomada d'água da usina.	m ³ /s	Medição realizada por estações hidrométricas e sistemas	Dependente do regime hidrológico da Bacia do Rio Madeira, cuja vazão média
Vazão Defluente	Volume de água liberado pelas turbinas e vertedouros.	m ³ /s	Monitoramento operacional contínuo da usina.	Controlada conforme critérios operativos definidos pelo ONS e pelas
Garantia Física	Montante de energia que a usina pode comercializar	MW médio	Definida pelo MME e homologada pela	Aproximadamente 2.424 MW médios de energia
Rendimento dos Geradores	Eficiência da conversão da energia mecânica em energia elétrica.	%	$\eta = \text{Potência Elétrica} \div \text{Potência Mecânica}$.	Rendimento máximo de 98,19%, evidenciando elevada eficiência
Taxa de Indisponibilidade de	Percentual do tempo em que as unidades permanecem indisponíveis	%	$\text{Horas Indisponíveis} \div \text{Horas Totais}$.	Indicador utilizado pelo ONS e pela concessionária para avaliação da

Autoria Própria/IA

A análise da tabela 2 evidencia que cada indicador representa um aspecto específico do desempenho operacional da usina. A potência instalada, por exemplo, expressa a capacidade máxima de geração do empreendimento quando todas as unidades geradoras operam simultaneamente, enquanto a energia gerada representa a produção efetivamente registrada em determinado intervalo de tempo. A comparação entre esses dois parâmetros permite determinar o fator de capacidade, indicador amplamente utilizado para avaliar o grau de aproveitamento da infraestrutura instalada.

Entre os parâmetros apresentados, a vazão afluentes constitui uma das variáveis mais importantes para a operação da UHE Santo Antônio. Em razão do conceito de usina a fio d'água, a geração de energia depende diretamente da disponibilidade hídrica do rio Madeira, tornando a vazão um dos principais fatores condicionantes da produção energética. Durante os períodos de cheia, a maior disponibilidade de água

possibilita aumento da geração elétrica, enquanto eventos de estiagem reduzem a vazão disponível para turbinamento, influenciando diretamente indicadores como energia gerada, fator de capacidade e disponibilidade operacional.

Outro indicador de grande relevância corresponde à garantia física, definida pelo Ministério de Minas e Energia (MME) como o montante máximo de energia que o empreendimento pode comercializar no mercado regulado considerando critérios de segurança energética do sistema elétrico. Diferentemente da potência instalada, a garantia física incorpora análises hidrológicas de longo prazo e constitui um dos principais parâmetros utilizados no planejamento da expansão do setor elétrico brasileiro.

Os indicadores relacionados à disponibilidade operacional, ao rendimento dos geradores e às taxas de indisponibilidade permitem avaliar a confiabilidade do conjunto eletromecânico instalado na usina. Esses parâmetros são continuamente monitorados pelos sistemas supervisórios da concessionária e compartilhados com o Operador Nacional do Sistema Elétrico, permitindo identificar desvios operacionais, programar intervenções de manutenção e manter elevados índices de disponibilidade das unidades geradoras.

No caso específico da UHE Santo Antônio, a potência instalada total de 3.568 MW, associada a uma geração média anual próxima de 16,9 TWh e a um fator de capacidade médio de aproximadamente 54%, evidencia o elevado aproveitamento energético obtido mesmo em uma usina do tipo fio d'água. Esses resultados refletem a adequação da solução tecnológica adotada às características hidrológicas do rio Madeira e demonstram a importância do monitoramento contínuo dos indicadores operacionais para garantir elevados níveis de eficiência, confiabilidade e segurança no fornecimento de energia ao Sistema Interligado Nacional.

2.3 Gerenciamento e Controle Operacional da Usina Hidrelétrica de Santo Antônio

2.3.1 Produção estatística e monitoramento operacional

A operação de uma usina hidrelétrica de grande porte depende da aquisição contínua de dados operacionais capazes de representar, em tempo real, as condições de funcionamento dos equipamentos, do regime hidrológico e da produção de energia elétrica. Nesse contexto, a produção estatística constitui um dos principais instrumentos de gerenciamento operacional, permitindo acompanhar o desempenho do empreendimento, identificar desvios de operação, subsidiar programas de manutenção e apoiar o planejamento energético do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Na UHE Santo Antônio, o monitoramento operacional é realizado por meio de sistemas digitais de supervisão e controle (SCADA), responsáveis pela aquisição automática de informações provenientes das unidades geradoras, equipamentos eletromecânicos e estruturas hidráulicas da usina. Entre as principais variáveis monitoradas destacam-se a potência gerada, vazão turbinada, níveis hidráulicos, temperatura dos mancais, vibração das máquinas, tensão, corrente elétrica, frequência, posição das comportas, disponibilidade das unidades geradoras e demais parâmetros associados ao funcionamento do empreendimento.

Os dados coletados são armazenados continuamente em bancos de dados operacionais, possibilitando análises estatísticas em diferentes escalas temporais. Essas informações permitem acompanhar o comportamento histórico da geração, identificar tendências operacionais, avaliar o desempenho dos equipamentos e fornecer suporte técnico às decisões relacionadas à manutenção preditiva, preventiva e corretiva das unidades geradoras.

Além do gerenciamento interno realizado pela concessionária, parte dessas informações é compartilhada em tempo real com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), permitindo o acompanhamento permanente das condições operativas da usina e sua integração ao planejamento energético nacional. O ONS utiliza esses dados para acompanhar a disponibilidade das unidades geradoras, avaliar as condições hidrológicas da bacia do rio Madeira e definir a participação da UHE Santo Antônio no despacho da geração elétrica do Sistema Interligado Nacional.

O processo decisório empregado pelo ONS baseia-se na utilização de modelos computacionais de otimização energética desenvolvidos especificamente para o planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro. Entre os principais destacam-se o NEWAVE, utilizado no planejamento de longo prazo; o DECOMP, empregado na programação da operação de médio prazo; e o DESSEM, responsável pelo despacho hidrotérmico de curtíssimo prazo. Esses modelos integram séries históricas de vazões, previsões meteorológicas, níveis dos reservatórios, disponibilidade das usinas, restrições de transmissão, projeções de carga e custos de operação, buscando determinar a estratégia de geração capaz de garantir simultaneamente segurança energética, confiabilidade operativa e minimização dos custos globais do sistema (ONS, 2024; EPE, 2024).

No caso específico da UHE Santo Antônio, o monitoramento hidrológico assume importância ainda maior em razão do conceito de usina a fio d'água. Como o empreendimento possui reduzida capacidade de regularização do reservatório, sua produção de energia depende diretamente da vazão afluyente do rio

Madeira. Dessa forma, informações provenientes de estações fluviométricas, pluviométricas, sensores telemétricos e previsões hidrometeorológicas são continuamente incorporadas aos modelos de planejamento utilizados pelo ONS para estimar aflúências futuras e definir estratégias de operação compatíveis com as condições hidrológicas observadas na bacia.

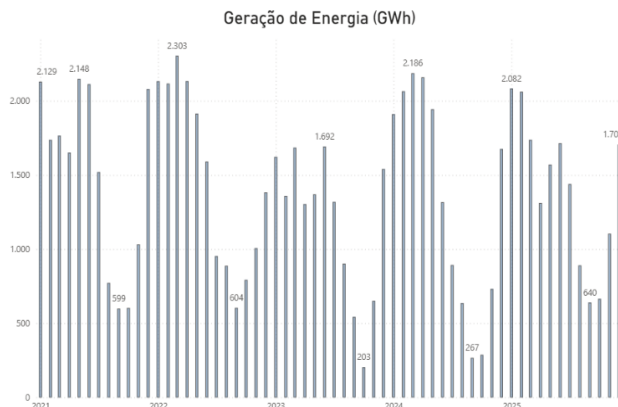
A integração entre monitoramento operacional, produção estatística e modelagem computacional permite que decisões relacionadas ao despacho da geração sejam fundamentadas em informações técnicas continuamente atualizadas. Mais do que registrar o desempenho da usina, os indicadores operacionais tornam-se instrumentos essenciais para antecipar cenários hidrológicos, otimizar o aproveitamento dos recursos hídricos disponíveis e assegurar elevados níveis de confiabilidade ao Sistema Interligado Nacional.

Assim, a produção estatística deixa de representar apenas um conjunto de registros históricos e passa a constituir um componente estratégico da gestão operacional da UHE Santo Antônio. A utilização integrada de sistemas supervisórios, modelos computacionais e indicadores de desempenho possibilita maximizar a eficiência energética do empreendimento, reduzir riscos operacionais e fortalecer a segurança do sistema elétrico brasileiro.

2.3.2 Comportamento da geração de energia da UHE Santo Antônio

A geração de energia elétrica da UHE Santo Antônio apresenta elevada dependência das condições hidrológicas do rio Madeira. Em razão do conceito de usina a fio d'água, a produção energética acompanha diretamente as oscilações naturais de vazão da bacia hidrográfica, refletindo os períodos de cheia e estiagem característicos da região amazônica. Dessa forma, a análise da evolução temporal da geração permite compreender a influência do regime hidrológico sobre o desempenho operacional do empreendimento.

Figura 9 – Histórico mensal de geração de energia da UHE Santo Antônio (2021–2025).



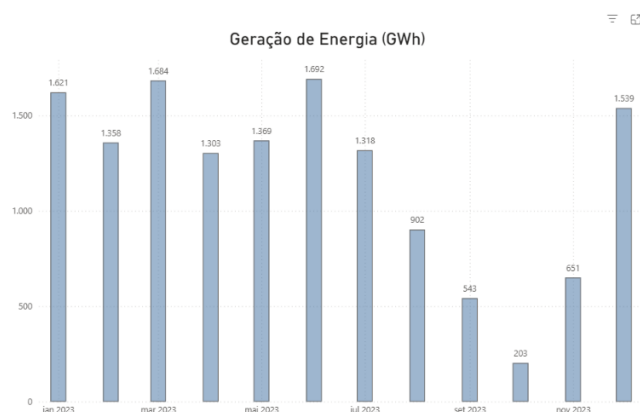
Fonte: ONS 2026.

A Figura 9 evidencia o comportamento sazonal da geração de energia entre os anos de 2021 e 2025. Observa-se um padrão recorrente de aumento da produção durante o primeiro semestre de cada ano, período correspondente às maiores vazões do rio Madeira, seguido de redução gradual da geração ao longo do segundo semestre, acompanhando o período de estiagem. Esse comportamento confirma a forte dependência da usina em relação às condições hidrológicas naturais da bacia, característica típica de empreendimentos do tipo fio d'água.

Além da sazonalidade anual, verifica-se a ocorrência de eventos hidrológicos extremos que influenciaram significativamente o desempenho operacional da usina. Destaca-se a redução expressiva da geração observada durante o segundo semestre de 2023, quando alguns meses apresentaram valores inferiores a 300 GWh. Esse comportamento está diretamente associado à severa estiagem registrada na Amazônia naquele período, considerada uma das mais intensas das últimas décadas. A redução da vazão do rio Madeira limitou a disponibilidade hídrica para turbinamento, exigindo adaptações operacionais e reduzindo temporariamente a capacidade de geração da usina.

O histórico também demonstra a elevada capacidade de recuperação operacional do empreendimento. Com o retorno das condições hidrológicas favoráveis durante o período chuvoso de 2024, a produção energética voltou a atingir valores superiores a 2.000 GWh em alguns meses, evidenciando que a redução observada em 2023 esteve diretamente relacionada às condições hidrológicas excepcionais, e não a limitações técnicas das unidades geradoras.

Figura 10: Geração mensal de energia da UHE Santo Antônio em 2023



Fonte: ONS 2026.

A Figura 10 detalha o comportamento da geração ao longo de 2023, permitindo observar com maior precisão os efeitos da estiagem extrema sobre a produção de energia. Nos primeiros meses do ano, quando predominavam elevadas vazões na bacia do rio Madeira, a geração manteve-se acima de aproximadamente 1.300 GWh por mês, atingindo seu maior valor em junho (1.692 GWh). A partir de julho inicia-se uma redução progressiva da produção, acompanhando o declínio da vazão afluente observado durante a estação seca.

Os impactos tornam-se mais evidentes entre setembro e outubro, quando a geração mensal se reduz para aproximadamente 543 GWh e atinge o valor mínimo de 203 GWh, respectivamente. Esses resultados refletem diretamente as restrições impostas pela disponibilidade hídrica durante o período crítico da estiagem amazônica, demonstrando a elevada sensibilidade operacional das usinas a fio d'água às variações hidrológicas naturais.

Com o restabelecimento gradual das vazões no final do ano, observa-se recuperação progressiva da produção energética, alcançando aproximadamente 1.539 GWh em dezembro. Esse comportamento evidencia que a operação da UHE Santo Antônio acompanha de forma praticamente imediata as alterações do regime hidrológico da bacia, característica que diferencia empreendimentos a fio d'água das hidrelétricas dotadas de grandes reservatórios de regularização.

Os resultados apresentados demonstram que o desempenho operacional da UHE Santo Antônio está fortemente condicionado às condições hidrológicas do rio Madeira. Embora essa característica torne a geração mais suscetível aos eventos climáticos extremos, a integração da usina ao Sistema Interligado Nacional permite que reduções temporárias de produção sejam compensadas por outras fontes de geração distribuídas pelo país. Dessa forma, o empreendimento mantém sua elevada importância estratégica para o atendimento da demanda energética nacional, ao mesmo tempo em que evidencia a necessidade de monitoramento hidrológico contínuo e planejamento operacional integrado para garantir a confiabilidade do sistema elétrico brasileiro.

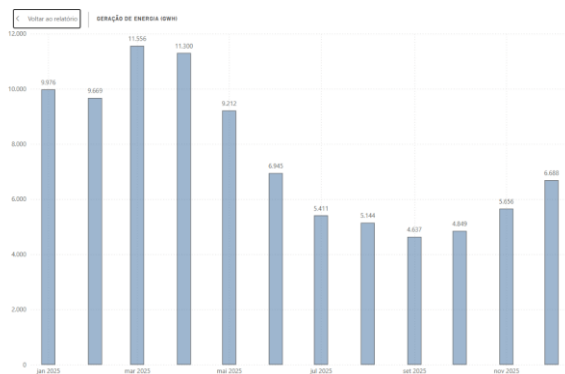
2.3.3 Influência do regime hidrológico do rio Madeira na geração de energia

A geração de energia elétrica da UHE Santo Antônio está diretamente condicionada ao comportamento hidrológico da bacia do rio Madeira. Como o empreendimento foi concebido segundo o conceito de usina a fio d'água, sua capacidade de geração depende predominantemente da vazão natural do rio, tornando as oscilações hidrológicas o principal fator responsável pelas variações observadas na produção de energia ao longo do ano.

A bacia hidrográfica do rio Madeira possui área aproximada de 1,42 milhão de quilômetros quadrados, abrangendo territórios do Brasil, Bolívia e Peru, o que lhe confere caráter transfronteiriço e elevada complexidade hidrológica. Aproximadamente 43% de sua área localiza-se em território brasileiro, enquanto os 57% restantes encontram-se distribuídos principalmente entre Bolívia e Peru (ANA, 2024). Essa ampla área de drenagem faz com que o comportamento hidrológico do rio resulte da interação entre diferentes regimes climáticos, influenciando diretamente a disponibilidade hídrica para geração de energia.

O regime hidrológico da bacia apresenta forte sazonalidade, caracterizada por um período chuvoso compreendido, em geral, entre os meses de novembro e abril e por um período seco entre maio e outubro. A precipitação média anual é da ordem de 2.088 mm, enquanto a vazão média de longo termo do rio Madeira alcança aproximadamente 34.425 m³/s (ANA, 2024). Essas variações sazonais refletem-se diretamente na operação da UHE Santo Antônio, determinando os períodos de maior e menor disponibilidade de energia ao longo do ano.

Figura 11: – Geração de energia elétrica da Região Norte em 2025.



Fonte: ONS, 2026.

A Figura 11 apresenta a evolução mensal da geração de energia elétrica da Região Norte ao longo de 2025. Observa-se que a produção regional apresenta comportamento claramente sazonal, acompanhando o ciclo hidrológico característico da Amazônia. Os maiores volumes de geração concentram-se entre os meses de janeiro e abril, período correspondente à estação chuvosa, quando os rios da região apresentam maiores vazões e elevada disponibilidade hídrica para geração de energia. O pico registrado em março, superior a 11.500 GWh, evidencia a elevada contribuição das usinas hidrelétricas durante esse período.

A partir de maio verifica-se redução gradual da produção energética regional, acompanhando o início da estação seca e a diminuição das vazões dos principais rios amazônicos. Os menores valores são observados entre agosto e setembro, quando a geração se aproxima de 4.600 GWh, representando redução superior a 50% em relação aos meses de maior produção. A partir de outubro observa-se recuperação gradual da geração, acompanhando o retorno das precipitações e o aumento progressivo das vazões na bacia amazônica.

Embora a Figura 11 represente a geração agregada da Região Norte, esse comportamento reproduz a dinâmica operacional observada na UHE Santo Antônio. Por se tratar de uma usina a fio d'água, sua produção acompanha diretamente a disponibilidade hídrica do rio Madeira, apresentando maior geração durante o período de cheias e redução da produção durante a estação seca. Essa relação evidencia a forte dependência existente entre o desempenho operacional da usina e o regime hidrológico da bacia.

Sob a perspectiva do Sistema Interligado Nacional, essa sazonalidade reforça a importância da operação coordenada realizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Durante os períodos de menor geração hidrelétrica na Região Norte, o sistema utiliza a complementaridade entre diferentes fontes de geração — como hidrelétricas de outras bacias, usinas termelétricas, parques eólicos e sistemas fotovoltaicos — para garantir o atendimento da demanda elétrica nacional. Da mesma forma, durante os meses de elevada disponibilidade hídrica, a geração proveniente das usinas do rio Madeira contribui significativamente para o suprimento energético do país, reduzindo a necessidade de despacho de fontes com maior custo operacional.

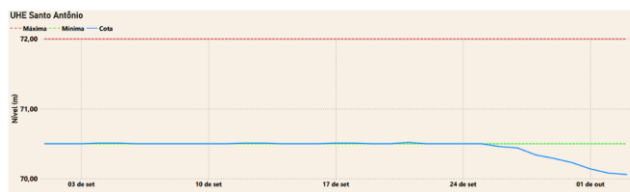
Os resultados apresentados demonstram que o regime hidrológico do rio Madeira constitui o principal fator condicionante da geração da UHE Santo Antônio e exerce influência direta sobre o comportamento energético da Região Norte. Dessa forma, o monitoramento contínuo das condições hidrológicas da bacia, aliado aos modelos de previsão utilizados pelo ONS, torna-se essencial para o planejamento da operação da usina e para a manutenção da confiabilidade do Sistema Interligado Nacional.

2.3.4 Evento de restrição hídrica de 2023 e seus impactos operacionais

O ano de 2023 foi marcado por uma das mais severas estiagens registradas na Amazônia nas últimas décadas. A atuação do fenômeno El Niño, associada à redução das precipitações sobre a bacia amazônica, provocou diminuição expressiva das vazões dos principais rios da região, entre eles o rio Madeira. Como consequência, diversos setores dependentes dos recursos hídricos foram impactados, incluindo a navegação, o abastecimento público, a pesca e a geração de energia elétrica (ANA, 2023; ONS, 2023).

Os boletins hidrológicos emitidos pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) entre agosto e outubro de 2023 registraram níveis excepcionalmente baixos no rio Madeira, caracterizando uma situação hidrológica crítica para a operação das usinas hidrelétricas instaladas na bacia. Em razão de seu reduzido volume de regularização, a UHE Santo Antônio apresentou elevada sensibilidade à diminuição da vazão afluente, característica inerente aos empreendimentos do tipo fio d'água.

Figura 12: Evolução dos níveis do rio Madeira durante a seca de 2023.



Fonte: ANA, 2026.

A Figura 12 evidencia a evolução da cota operacional da UHE Santo Antônio durante o período crítico da estiagem. Observa-se que, ao longo da maior parte de setembro, o nível manteve-se relativamente estável, próximo à cota normal de operação. Entretanto, nos últimos dias do mês ocorre uma redução progressiva do nível d'água, aproximando-se do limite mínimo operacional da usina. Essa diminuição reflete diretamente a redução da vazão do rio Madeira, consequência da estiagem extrema observada na bacia.

Como resultado desse cenário hidrológico, a UHE Santo Antônio interrompeu totalmente sua geração de energia em 2 de outubro de 2023, tornando-se a primeira grande hidrelétrica brasileira a suspender completamente sua operação em razão da escassez hídrica. A paralisação ocorreu porque a vazão disponível deixou de atender às condições mínimas necessárias para garantir o funcionamento seguro das turbinas Bulbo, comprometendo a estabilidade hidráulica das unidades geradoras e a segurança operacional do empreendimento.

A retomada da operação ocorreu em 16 de outubro de 2023, inicialmente com número reduzido de unidades geradoras em funcionamento e geração parcial de energia. À medida que as vazões do rio Madeira aumentaram com o retorno gradual das precipitações na bacia, novas unidades foram sendo incorporadas à operação até o restabelecimento das condições normais de geração.

Do ponto de vista do Sistema Interligado Nacional, o evento demonstrou a importância da operação integrada coordenada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico. Durante a paralisação da UHE Santo Antônio, o ONS promoveu o redespacho da geração elétrica, ampliando a participação de usinas termelétricas, de hidrelétricas localizadas em outras bacias hidrográficas e de fontes renováveis complementares, como a geração eólica e solar. Essas medidas permitiram preservar o atendimento à demanda nacional, mesmo diante da indisponibilidade temporária de uma das maiores hidrelétricas do país (ONS, 2023).

Sob a perspectiva da engenharia de operação, o episódio evidenciou uma das principais limitações das usinas a fio d'água: sua elevada dependência das condições hidrológicas naturais. Embora esse modelo reduza significativamente os impactos associados à formação de grandes reservatórios, ele torna a geração mais vulnerável a eventos extremos de seca. Assim, a experiência observada em 2023 reforça a necessidade de aperfeiçoamento contínuo dos sistemas de monitoramento hidrológico, dos modelos de previsão utilizados pelo ONS e das estratégias de planejamento energético capazes de aumentar a resiliência do Sistema Interligado Nacional frente às mudanças climáticas e à maior frequência de eventos hidrológicos extremos.

2.3.5 Atuação do ONS e importância estratégica da UHE Santo Antônio para o Sistema Interligado Nacional

A coordenação da operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) é atribuição do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), instituição responsável pelo planejamento, programação e controle em tempo real da geração e da transmissão de energia elétrica no Brasil. Para cumprir essa função, o ONS monitora continuamente as condições hidrológicas, a disponibilidade das unidades geradoras, o carregamento das linhas de transmissão e a evolução da demanda de energia, definindo estratégias operacionais que assegurem a confiabilidade e a segurança do suprimento elétrico nacional (ONS, 2024).

No caso da UHE Santo Antônio, a atuação do ONS assume importância estratégica devido à elevada participação do empreendimento no atendimento do Sistema Interligado Nacional e à sua localização na região Norte, onde se concentra parcela significativa do potencial hidrelétrico brasileiro. Integrada ao Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira, juntamente com a UHE Jirau, a usina contribui com mais de 7.300 MW de potência instalada, sendo responsável por parcela expressiva da energia produzida na região e transmitida aos principais centros consumidores do país por meio do sistema de transmissão em corrente contínua (HVDC) entre Porto Velho (RO) e Araraquara (SP).

Esse episódio demonstrou que a segurança energética brasileira não depende exclusivamente da capacidade de geração de grandes empreendimentos hidrelétricos, mas também da integração proporcionada pelo Sistema Interligado Nacional. A possibilidade de intercâmbio de energia entre diferentes regiões permite compensar reduções temporárias de geração provocadas por eventos hidrológicos extremos, aumentando a resiliência do sistema elétrico frente às oscilações climáticas.

Ao mesmo tempo, a experiência de 2023 evidenciou que usinas do tipo fio d'água, embora apresentem vantagens ambientais decorrentes da reduzida área inundada, possuem maior sensibilidade às variações naturais de vazão quando comparadas a empreendimentos dotados de grandes reservatórios de regularização. Esse aspecto reforça a necessidade de aperfeiçoamento contínuo dos sistemas de monitoramento hidrológico, dos modelos computacionais de previsão e das estratégias de planejamento energético utilizadas pelo ONS.

Sob a perspectiva do planejamento do setor elétrico, a UHE Santo Antônio permanece como um empreendimento estratégico para o Sistema Interligado Nacional. Sua elevada capacidade instalada, associada à moderna infraestrutura de transmissão e à integração operacional promovida pelo ONS, garante contribuição significativa para a segurança energética do país. Entretanto, os eventos climáticos recentes demonstram que a crescente frequência de estiagens severas exige investimentos permanentes em diversificação da matriz elétrica, ampliação da infraestrutura de transmissão e aperfeiçoamento das ferramentas de monitoramento e gestão dos recursos hídricos, de forma a assegurar a confiabilidade do sistema elétrico brasileiro diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

2.4 Impactos socioambientais e medidas compensatórias da UHE Santo Antônio

2.4.1 Impactos socioambientais da Usina Hidrelétrica de Santo Antônio

A implantação de grandes empreendimentos hidrelétricos produz transformações que extrapolam os aspectos relacionados à geração de energia elétrica, influenciando de forma significativa os componentes ambientais, sociais, econômicos e territoriais das regiões onde são instalados. Em empreendimentos localizados na Amazônia, essas transformações assumem maior complexidade em razão da elevada biodiversidade, da extensa rede hidrográfica e da forte dependência das comunidades locais em relação aos recursos naturais.

No caso da UHE Santo Antônio, a implantação do empreendimento promoveu alterações na dinâmica hidrológica do rio Madeira e modificações em diferentes componentes do ambiente físico e biológico. Entre os principais impactos ambientais identificados destacam-se alterações no regime de escoamento do rio, processos erosivos em determinados trechos das margens, mudanças na dinâmica de transporte de sedimentos e interferências sobre ecossistemas aquáticos. Estudos também registraram preocupações relacionadas à conservação da fauna regional, especialmente de espécies sensíveis às alterações ambientais, como o boto amazônico (*Inia geoffrensis*) e o tucuxi (*Sotalia fluviatilis*), cuja distribuição e comportamento podem ser influenciados pelas mudanças nas condições hidrológicas e na disponibilidade de habitats (SAE, 2022b).

Entretanto, os efeitos decorrentes da implantação da usina não se restringem aos aspectos ambientais. A fase de construção provocou intenso crescimento populacional no município de Porto Velho, impulsionado pela migração de trabalhadores e empresas vinculadas ao empreendimento. Esse processo resultou em aumento da demanda por infraestrutura urbana, serviços públicos, habitação, saúde, educação e assistência social, gerando desafios para o planejamento urbano e para a capacidade de atendimento do poder público.

Sob a perspectiva socioeconômica, Ribeiro e Moret (2014) destacam que os impactos produzidos por grandes empreendimentos hidrelétricos frequentemente ultrapassam os limites físicos diretamente ocupados pelas obras. Segundo os autores, alterações nas atividades pesqueiras, nas formas de ocupação do território e nas relações econômicas locais provocam mudanças significativas nos modos de vida das populações atingidas, produzindo efeitos que permanecem mesmo após a conclusão das obras.

Essa interpretação é reforçada por Moret et al. (2014), que argumentam que a avaliação dos impactos socioambientais deve considerar não apenas alterações nos indicadores físicos, químicos e biológicos, mas também aspectos relacionados à identidade cultural, às formas tradicionais de uso dos recursos naturais e às relações históricas estabelecidas entre as comunidades e seus territórios. Nessa perspectiva, a análise dos impactos ultrapassa a dimensão ambiental e incorpora elementos sociais e culturais frequentemente pouco representados pelos indicadores convencionais de monitoramento.

Os relatórios de monitoramento ambiental elaborados durante a fase de operação da UHE Santo Antônio indicam que diversos parâmetros ambientais permaneceram dentro dos limites estabelecidos pelos órgãos reguladores, refletindo a efetividade de parte dos programas de controle e mitigação implementados pelo empreendimento (SAE, 2022b). Contudo, a literatura especializada ressalta que o atendimento aos parâmetros legais não elimina, necessariamente, todos os impactos socioambientais associados à implantação de grandes hidrelétricas, especialmente aqueles relacionados às transformações territoriais, às mudanças nas atividades econômicas tradicionais e às dinâmicas sociais das comunidades afetadas (RIBEIRO; MORET, 2014; MORET et al., 2014).

Dessa forma, a experiência da UHE Santo Antônio evidencia que a avaliação de empreendimentos hidrelétricos deve integrar indicadores ambientais, operacionais e socioeconômicos, permitindo compreender de maneira mais abrangente os efeitos produzidos pela implantação e operação desses projetos. Essa abordagem integrada contribui para o aperfeiçoamento dos processos de licenciamento, do monitoramento ambiental e das políticas públicas voltadas ao desenvolvimento sustentável da Amazônia.

2.4.2 Populações atingidas e processos de desterritorialização

A implantação de grandes empreendimentos hidrelétricos frequentemente promove transformações territoriais que extrapolam os limites físicos das áreas diretamente ocupadas pelas obras. Nesse contexto, o conceito de população atingida não se restringe aos indivíduos removidos compulsoriamente, abrangendo também grupos sociais que mantêm relações econômicas, culturais, produtivas e simbólicas com o território afetado. Essa perspectiva amplia a compreensão dos impactos decorrentes da implantação de usinas hidrelétricas, incorporando dimensões sociais que nem sempre são captadas pelos estudos tradicionais de impacto ambiental.

Segundo Moret (2014), a análise dos impactos associados aos empreendimentos hidrelétricos deve considerar a complexa relação entre os indivíduos e o espaço geográfico, reconhecendo que o território representa não apenas um suporte físico para moradia ou produção econômica, mas também um espaço de construção da identidade cultural, das relações sociais e das formas tradicionais de utilização dos recursos naturais. Sob essa perspectiva, os efeitos produzidos pelas hidrelétricas não podem ser avaliados exclusivamente a partir das áreas inundadas ou do número de famílias reassentadas.

No caso da UHE Santo Antônio, a implantação do empreendimento exigiu a realização de programas de reassentamento destinados às populações diretamente afetadas pelas obras. De acordo com Costa (2017), aproximadamente 505 famílias foram fisicamente deslocadas durante o processo de implantação da usina, sendo realocadas para áreas previamente definidas pelos programas de compensação e reassentamento. Embora essas medidas tenham atendido às exigências estabelecidas no processo de licenciamento ambiental, diversos estudos apontam que os impactos decorrentes do deslocamento extrapolam os aspectos relacionados à mudança de residência.

Nogueira (2017) argumenta que os processos de desterritorialização não se limitam à remoção física das populações, envolvendo também a ruptura de vínculos históricos, culturais, econômicos e afetivos construídos ao longo do tempo entre as comunidades e seus territórios. Em regiões amazônicas, onde as atividades produtivas e os modos de vida estão fortemente associados aos rios e aos recursos naturais, essas transformações podem modificar profundamente as estratégias de subsistência, as redes de sociabilidade e a identidade das populações atingidas.

Essa interpretação é complementada por Ribeiro e Moret (2014), que destacam que muitos impactos sociais permanecem mesmo após a conclusão das obras, manifestando-se por meio de alterações nas atividades pesqueiras, na dinâmica econômica local, nas formas de ocupação territorial e nas relações estabelecidas entre as comunidades e o ambiente. Assim, a categoria "população atingida" deve ser compreendida de maneira ampliada, contemplando também indivíduos e grupos que, embora não tenham sido removidos fisicamente, sofreram alterações significativas em suas condições de vida em decorrência da implantação do empreendimento.

Dessa forma, a experiência da UHE Santo Antônio evidencia que os processos de reassentamento representam apenas uma das dimensões dos impactos sociais produzidos por grandes empreendimentos hidrelétricos. A compreensão dos efeitos associados à desterritorialização exige uma abordagem integrada, capaz de considerar simultaneamente os aspectos materiais do deslocamento, as transformações econômicas e as dimensões culturais e identitárias relacionadas ao território. Essa perspectiva amplia a avaliação dos impactos socioambientais e contribui para o aperfeiçoamento das políticas de compensação e acompanhamento das populações afetadas por empreendimentos de infraestrutura.

2.4.3 Programas compensatórios e medidas mitigadoras

Como parte das condicionantes estabelecidas durante o processo de licenciamento ambiental da UHE Santo Antônio, foram implementados programas destinados à mitigação, compensação e monitoramento dos impactos decorrentes da implantação e da operação do empreendimento. Esses programas constituem instrumentos de gestão ambiental previstos na legislação brasileira e têm como objetivo reduzir os efeitos negativos das intervenções sobre os meios físico, biótico e socioeconômico, promovendo o acompanhamento contínuo das condições ambientais e das comunidades atingidas.

No caso da UHE Santo Antônio, o conjunto de programas ambientais foi estruturado sob supervisão do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), contemplando ações voltadas ao monitoramento da qualidade da água, da ictiofauna, da fauna terrestre, da cobertura vegetal, dos processos erosivos e hidrossedimentológicos, além de programas de saúde pública, reassentamento populacional e desenvolvimento socioeconômico das comunidades afetadas (IBAMA, 2008; SAE, 2020).

Entre as principais iniciativas implementadas destacam-se o monitoramento hidrossedimentológico do rio Madeira, o acompanhamento da migração de peixes, os programas de conservação da biodiversidade, a recuperação de áreas degradadas, a recomposição da cobertura vegetal, o apoio às atividades pesqueiras e o acompanhamento técnico e social das famílias reassentadas. Essas ações foram desenvolvidas ao longo das fases de implantação e operação da usina, buscando reduzir os impactos identificados durante os estudos ambientais e atender às condicionantes estabelecidas no processo de licenciamento (SAE, 2020; SAE, 2022).

O acompanhamento da efetividade dessas medidas é realizado por meio de campanhas periódicas de campo, estações automáticas de monitoramento hidrológico, levantamentos socioeconômicos, auditorias ambientais e elaboração de relatórios técnicos encaminhados aos órgãos ambientais competentes. Os resultados obtidos são avaliados continuamente pelo IBAMA e pelas demais instituições responsáveis pelo acompanhamento das condicionantes ambientais, permitindo a identificação de eventuais desvios e a adoção de medidas corretivas sempre que necessário (IBAMA, 2008; SAE, 2022).

Além dos indicadores ambientais tradicionalmente utilizados, o processo de monitoramento contempla parâmetros relacionados às condições de moradia, acesso a serviços públicos, geração de renda, adaptação das famílias reassentadas e desenvolvimento das comunidades afetadas. Essa abordagem evidencia uma evolução na avaliação dos impactos ambientais, incorporando dimensões sociais e econômicas que complementam os indicadores físicos, químicos e biológicos normalmente empregados em programas de monitoramento.

Entretanto, a literatura especializada ressalta que a efetividade das medidas compensatórias não pode ser avaliada apenas pelo cumprimento das exigências legais ou pela manutenção dos indicadores ambientais

dentro dos limites estabelecidos pelos órgãos reguladores. Moret et al. (2014) argumentam que os impactos decorrentes da implantação de grandes hidrelétricas possuem natureza multidimensional e podem manifestar-se ao longo de vários anos, exigindo avaliações de longo prazo que considerem aspectos culturais, econômicos e territoriais frequentemente pouco representados pelos programas convencionais de monitoramento.

Em consonância com essa perspectiva, Ribeiro e Moret (2016) destacam que processos como a reorganização das atividades produtivas, as alterações nas relações comunitárias e as mudanças nos modos de vida das populações atingidas nem sempre podem ser plenamente compensados por programas ambientais ou por indenizações financeiras. Segundo os autores, a efetividade das medidas compensatórias depende da continuidade das ações implementadas, da participação das comunidades envolvidas e do acompanhamento permanente das transformações sociais produzidas pelo empreendimento.

Assim, a experiência da UHE Santo Antônio demonstra que os programas compensatórios constituem instrumentos fundamentais para a gestão ambiental de grandes empreendimentos hidrelétricos, contribuindo para a mitigação de diversos impactos identificados durante o licenciamento. Entretanto, a análise integrada dos documentos técnicos e da literatura científica evidencia que a efetividade dessas ações depende de processos contínuos de monitoramento, revisão e aperfeiçoamento, capazes de contemplar não apenas os aspectos ambientais, mas também as dimensões sociais, econômicas e culturais associadas às populações atingidas.

2.4.4 Desenvolvimento sustentável e limitações do modelo hidrelétrico

A expansão da geração hidrelétrica no Brasil está historicamente associada ao conceito de desenvolvimento sustentável, fundamentado na busca pelo equilíbrio entre crescimento econômico, preservação ambiental e desenvolvimento social. No setor elétrico, esse princípio tem orientado o planejamento de novos empreendimentos, considerando que a geração hidrelétrica utiliza uma fonte renovável de energia e apresenta reduzidas emissões de gases de efeito estufa quando comparada às usinas termelétricas baseadas em combustíveis fósseis.

Sob essa perspectiva, a UHE Santo Antônio representa um exemplo da evolução tecnológica observada nos empreendimentos hidrelétricos brasileiros. A adoção do conceito de usina a fio d'água, associada à utilização de turbinas do tipo Bulbo, permitiu elevada capacidade de geração de energia com uma área inundada significativamente inferior à de empreendimentos hidrelétricos convencionais de potência semelhante. Essa configuração evidencia os avanços obtidos na busca por soluções capazes de conciliar eficiência energética e redução dos impactos ambientais associados à formação de grandes reservatórios.

Entretanto, a experiência da UHE Santo Antônio também demonstra que a sustentabilidade de grandes empreendimentos hidrelétricos não pode ser avaliada exclusivamente por indicadores técnicos de geração de energia ou pela redução da área alagada. Conforme discutido ao longo deste trabalho, a implantação da usina promoveu transformações ambientais, territoriais e sociais que envolveram alterações na dinâmica hidrológica do rio Madeira, processos de reassentamento populacional, mudanças nas atividades econômicas tradicionais e impactos sobre ecossistemas amazônicos, evidenciando a complexidade inerente à implantação de grandes obras de infraestrutura.

Nesse contexto, Costa (2017) argumenta que os processos de planejamento energético frequentemente priorizam indicadores econômicos e técnicos, atribuindo menor importância às dimensões sociais e ambientais associadas aos territórios afetados. De forma semelhante, Moret e Ferreira (2012) destacam que as políticas de expansão da infraestrutura energética frequentemente revelam conflitos entre os interesses estratégicos nacionais relacionados ao suprimento de energia e os impactos percebidos pelas populações locais, especialmente em regiões ambientalmente sensíveis como a Amazônia.

Os resultados apresentados neste estudo reforçam essa discussão. Embora a UHE Santo Antônio desempenhe papel estratégico para o Sistema Interligado Nacional, contribuindo significativamente para a segurança energética do país e para a expansão de uma matriz elétrica predominantemente renovável, o empreendimento também evidencia limitações inerentes ao modelo hidrelétrico brasileiro. Entre elas destacam-se a elevada dependência das condições hidrológicas, evidenciada pela interrupção temporária da geração durante a estiagem extrema de 2023, e os desafios associados à efetividade das medidas compensatórias implementadas junto às populações atingidas.

Esses resultados demonstram que a avaliação da sustentabilidade de grandes empreendimentos hidrelétricos deve incorporar uma abordagem multidimensional, capaz de integrar indicadores operacionais, ambientais, sociais e econômicos. A análise isolada da capacidade instalada, da energia gerada ou da eficiência operacional mostra-se insuficiente para representar a complexidade dos efeitos produzidos por esses empreendimentos sobre os territórios em que são implantados.

Dessa forma, a experiência da UHE Santo Antônio evidencia que o desenvolvimento sustentável, no contexto da geração hidrelétrica, não constitui uma condição alcançada apenas pelo emprego de tecnologias mais eficientes ou pela utilização de fontes renováveis de energia. Trata-se de um processo contínuo de planejamento, monitoramento e aperfeiçoamento institucional, no qual a segurança energética deve ser compatibilizada com a conservação ambiental, a proteção da biodiversidade e a garantia dos direitos e das condições de vida das populações afetadas. Essa perspectiva amplia a compreensão do papel das usinas hidrelétricas no desenvolvimento nacional e reforça a necessidade de políticas públicas que conciliem eficiência energética, responsabilidade socioambiental e adaptação às mudanças climáticas.

3 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar a implantação, a operação e o gerenciamento da Usina Hidrelétrica de Santo Antônio, abordando suas características técnicas, sua integração ao Sistema Interligado Nacional (SIN) e os principais impactos socioambientais decorrentes de sua implantação e operação. A partir da revisão bibliográfica e da análise de documentos técnicos e institucionais, foi possível compreender a importância do empreendimento para o setor elétrico brasileiro e os desafios associados à sua gestão.

Os resultados evidenciaram que a adoção do modelo de usina a fio d'água, associada às turbinas do tipo Bulbo, possibilitou elevado aproveitamento do potencial hidráulico do rio Madeira, com menor área inundada em comparação a empreendimentos convencionais de potência semelhante. Também foi constatada a relevância da UHE Santo Antônio para o SIN, tanto pela sua capacidade instalada quanto pela integração ao sistema de transmissão que conecta a região Norte aos principais centros consumidores do país.

A análise operacional demonstrou que o desempenho da usina está diretamente relacionado às condições hidrológicas do rio Madeira. A estiagem extrema registrada em 2023 evidenciou a vulnerabilidade dos empreendimentos a fio d'água frente à redução das vazões, ressaltando a importância do monitoramento hidrológico e da atuação do Operador Nacional do Sistema Elétrico na coordenação da operação do sistema.

Sob o ponto de vista socioambiental, verificou-se que, embora os programas de mitigação e compensação tenham contribuído para reduzir parte dos impactos decorrentes da implantação da usina, a literatura aponta que alterações territoriais, econômicas e sociais persistem ao longo do tempo. Esses resultados reforçam que a avaliação de grandes empreendimentos hidrelétricos deve considerar, de forma integrada, aspectos técnicos, ambientais e sociais.

Conclui-se, portanto, que a UHE Santo Antônio desempenha papel estratégico para a segurança energética nacional e representa um importante avanço tecnológico para a geração hidrelétrica brasileira. Entretanto, a sustentabilidade desse modelo depende do aperfeiçoamento contínuo da gestão dos recursos hídricos, do monitoramento ambiental e das políticas voltadas ao acompanhamento das populações afetadas, de modo a compatibilizar a expansão da geração de energia com a conservação ambiental e o desenvolvimento regional.

4 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2024**. Brasília, DF: ANA, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Boletins de monitoramento hidrológico do rio Madeira**. Brasília, DF: ANA, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH)**. Brasília, DF: ANA, 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução nº 351, de 11 de novembro de 1998.** Autoriza a criação do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Brasília, DF, 1998.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Banco de Informações de Geração – BIG.** Brasília, DF: ANEEL, 2025.

AXIA. **Mapa do Sistema Interligado Nacional (SIN).** 2026.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981.** Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1981.

BRASIL. **Lei nº 14.052, de 8 de setembro de 2020.** Dispõe sobre a prorrogação de concessões de geração de energia elétrica. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2020.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997.** Regulamenta os procedimentos de licenciamento ambiental. Brasília, DF, 1997.

COSTA, J. C. **Impactos socioambientais decorrentes da implantação da Usina Hidrelétrica Santo Antônio.** Porto Velho, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia 2055.** Rio de Janeiro: EPE, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Inventário Hidrelétrico da Bacia do Rio Madeira.** Rio de Janeiro: EPE, 2006.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2025.** Rio de Janeiro: EPE, 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz Elétrica Brasileira.** Rio de Janeiro: EPE, 2026.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. **Usina Hidrelétrica Santo Antônio.** Rio de Janeiro: Furnas, 2024.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. **Histórico da construção da UHE Santo Antônio.** Rio de Janeiro: Furnas, 2026.

GAMBETTI, R. **Vista geral das estruturas da UHE Santo Antônio.** 2015.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Licença de Operação da Usina Hidrelétrica Santo Antônio.** Brasília, DF, 2008.

MORET, A. S.; FERREIRA, L. V. **Grandes hidrelétricas na Amazônia e desenvolvimento regional.** Porto Velho, 2012.

MORET, A. S.; GUERRA, A.; FERREIRA, L. V. **Grandes projetos hidrelétricos na Amazônia: impactos e conflitos socioambientais.** Porto Velho, 2014.

NEOENERGIA. **Sistema Interligado Nacional (SIN).** Salvador, 2021.

NOGUEIRA, R. C. **Desterritorialização e impactos sociais decorrentes da implantação de grandes hidrelétricas na Amazônia.** Porto Velho, 2017.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Plano da Operação Energética.** Rio de Janeiro: ONS, 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Histórico de geração de energia da UHE Santo Antônio.** Rio de Janeiro: ONS, 2026.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Boletins de geração de energia**. Rio de Janeiro: ONS, 2026.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Sistema Interligado Nacional**. Rio de Janeiro: ONS, 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Sistema de transmissão em corrente contínua Porto Velho–Araraquara**. Rio de Janeiro: ONS, 2025.

PÊGO, B.; CAMPOS NETO, C. A. S. **Programa de Aceleração do Crescimento (PAC): infraestrutura e desenvolvimento**. Brasília: IPEA, 2008.

RIBEIRO, J. A.; MORET, A. S. **Grandes hidrelétricas na Amazônia: impactos socioambientais e desenvolvimento regional**. Porto Velho, 2014.

RIBEIRO, J. A.; MORET, A. S. **Impactos territoriais e políticas compensatórias em empreendimentos hidrelétricos**. Porto Velho, 2016.

SANTO ANTÔNIO ENERGIA. **Relatório de Sustentabilidade**. Porto Velho: Santo Antônio Energia, 2020.

SANTO ANTÔNIO ENERGIA. **Relatório de Sustentabilidade**. Porto Velho: Santo Antônio Energia, 2022.

SANTO ANTÔNIO ENERGIA. **Características técnicas da Usina Hidrelétrica Santo Antônio**. Porto Velho: Santo Antônio Energia, 2026.

SANTO ANTÔNIO ENERGIA. **Galeria de imagens institucionais**. Porto Velho: Santo Antônio Energia, 2026.
EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz Elétrica Brasileira**. Rio de Janeiro: EPE, 2026.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. **Construção da UHE Santo Antônio**. Rio de Janeiro: Furnas, 2026.

GAMBETTI, R. **Vista geral das estruturas da UHE Santo Antônio**. 2015.

SANTO ANTÔNIO ENERGIA. **Barragem da UHE Santo Antônio**. Porto Velho, 2026.

SANTO ANTÔNIO ENERGIA. **Vertedouro Principal da UHE Santo Antônio**. Porto Velho, 2026.

SANTO ANTÔNIO ENERGIA. **Turbina tipo Bulbo**. Porto Velho, 2026.

AXIA. **Mapa do Sistema Interligado Nacional (SIN)**. 2026.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Evolução da capacidade instalada do SIN**. Rio de Janeiro, 2026.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Histórico mensal de geração da UHE Santo Antônio (2021–2025)**. Rio de Janeiro, 2026.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Geração mensal da UHE Santo Antônio em 2023**. Rio de Janeiro, 2026.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Geração de energia elétrica da Região Norte em 2025**. Rio de Janeiro, 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Evolução dos níveis do rio Madeira durante a seca de 2023**. Brasília, DF, 2026.