

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DANGELO MATHEUS PEREIRA DE OLIVEIRA

**ESTUDO SOBRE UTILIZAÇÃO DE USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS
COM BOMBAS ALIMENTADAS POR GERAÇÃO EÓLICA PARA MELHORIA
DO DESPACHO HIDROTÉRMICO**

CURITIBA

2022

DANGELO MATHEUS PEREIRA DE OLIVEIRA

**ESTUDO SOBRE UTILIZAÇÃO DE USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS
COM BOMBAS ALIMENTADAS POR GERAÇÃO EÓLICA PARA MELHORIA
DO DESPACHO HIDROTÉRMICO**

**Study on the use of reversible hydroelectric plants with pumps powered by
wind generation to improve hydrothermal dispatch**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica do
curso de Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Profa. Dra. Nastasha Salame da
Silva

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

DANGELO MATHEUS PEREIRA DE OLIVEIRA

**ESTUDO SOBRE UTILIZAÇÃO DE USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS
COM BOMBAS ALIMENTADAS POR GERAÇÃO EÓLICA PARA MELHORIA
DO DESPACHO HIDROTÉRMICO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 03 de agosto de 2022

Nastasha Salame da Silva
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Annemarien Gehrke Castagna
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Andrea Lucia Costa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

CURITIBA

2022

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria de Jesus
Pereira, e ao meu pai, Geraldo Magela Valente,
por todo apoio durante toda a minha vida
acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Aos professores do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica pelas aulas que me motivaram a seguir nesta área de pesquisa. Sempre serei grato por todo o conhecimento adquirido durante toda a minha trajetória na Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Agradeço em especial a minha orientadora Profa Dra Nastasha Salame da Silva pelo auxílio na escolha do tema do trabalho, por toda a orientação, por sempre estar disposta a me ouvir e demonstrar confiança na minha capacidade.

À minha família e amigos, pois sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

A necessidade de diversificação da matriz energética brasileira é de grande importância, uma vez que a reduzida incidência de chuvas traz uma crise extensa na segurança energética do país. Além disso, há uma crescente utilização de fontes intermitentes no sistema que, em momentos de maior disponibilidade de energia, a potência gerada por essas fontes poderia ser armazenada. Uma forma de acumular essa energia seria com a utilização de Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs). Essas usinas bombeiam a água de um reservatório inferior para o superior por meio da utilização de bombas. Dessa forma, a energia gerada é armazenada na forma de energia potencial gravitacional. Essa aplicação ainda não foi implementada no Brasil e, portanto, possuem alguns desafios a serem superados antes de poderem atuar no sistema. Este trabalho traz um estudo preliminar que compara três cenários de custos de geração do subsistema Nordeste, sendo o primeiro sem a inserção de UHRs, o segundo com a inserção das reversíveis quando há excesso de geração e o terceiro cenário com a operação constante das UHRs ao longo do dia, a fim de verificar os possíveis impactos da presença dessas geradoras e os melhores casos para a aplicação das Usinas Reversíveis no Sistema Interligado Nacional.

Palavras-chave: armazenamento de energia; hidrelétrica; usina reversível; energia eólica.

ABSTRACT

The need to diversify the Brazilian energy matrix is of great importance, since the reduced incidence of rain brings an extensive crisis in the country's energy security. In addition, there is a growing use of intermittent sources in the system that, in times of greater energy availability, the power generated by these sources could be stored. One way to accumulate this energy would be with the use of Reversible Hydroelectric Power Plants (UHRs). These plants pump water from a lower reservoir to the upper one through the use of pumps. In this way, the generated energy is stored in the form of gravitational potential energy. This application has not yet been implemented in Brazil and, therefore, they have some challenges to be overcome before they can operate in the system. This work presents a preliminary study that compares three scenarios of Generation costs of the Northeast subsystem, the first without the insertion of UHRs, the second with the insertion of reversibles when there is excess generation and the third scenario with the constant operation of the UHRs throughout the day, in order to verify the possible impacts of the presence of these generators and the best cases for the application of Reversible Hydroelectric Power Plants in the National Interconnected System.

Keywords: energy storage; hydroelectric plant; pumped storage plant; wind energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação das máquinas elétricas rotativas	16
Figura 2 - Esquemático de uma UHE.....	19
Figura 3 - Aplicação de turbinas hidráulicas.....	20
Figura 4 - Matriz elétrica brasileira do ano de 2022	21
Figura 5 - Matriz elétrica mundial do ano de 2016	22
Figura 6 - Produção anual de energia na UHE Itaipu Binacional	24
Figura 7 - Desenho esquemático de uma turbina eólica	26
Figura 8 - Dimensões típicas das turbinas eólicas	27
Figura 9 - Curva de geração de energia elétrica da turbina eólica	27
Figura 10 – Comparação das vazões afluentes com a média mensal de velocidade do vento	28
Figura 11 - Sistemas de armazenamento de energia elétrica	29
Figura 12 - Capacidade instalada no mundo de energia eólica em GW	30
Figura 13 - Evolução da capacidade instalada no Brasil em MW.....	31
Figura 14 - Funcionamento de uma usina hidrelétrica reversível.....	32
Figura 15 – Exemplo esquemático de uma máquina reversível.....	34
Figura 16 - Curva de geração do subsistema Nordeste em 22/06/2021	39
Figura 17 - Diferença entre geração e carga do subsistema Nordeste	40
Figura 18 - Tipos de leilões de energia	40
Figura 19 - Curva de geração térmica do cenário 1	42
Figura 20 – Curva de custos do cenário 1	43
Figura 21 - Curva de operação da UHR no cenário 2	43
Figura 22 - Curva de geração térmica do cenário 2	44
Figura 23 - Curva de custos do cenário 2	44
Figura 24 - Curva de operação da UHR no cenário 3	45
Figura 25 - Curva de geração térmica do Cenário 3	46
Figura 26 - Curva de custos do cenário 3	46
Figura 27 – Comparação de geração térmica entre os cenários.....	47
Figura 28 - Comparação de custos entre os cenários.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidades instaladas por volume útil do reservatório superior entre a UHR Shisanling e as UHEs Três Irmãos e Ilha dos Pombos	36
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Produção acumulada das maiores UHEs em bilhões de MWh.	23
Quadro 2 - Potencial hidrelétrico brasileiro por região hidrográfica	24
Quadro 3 - Parâmetros de entrada da usina hipotética.	39
Quadro 4 – Preços por fonte	41

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de guas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABEEólica	Associao Brasileira de Energia Eólica
ONS	Operador Nacional do Sistema
MME	Ministério de Minas e Energia
IEA	<i>International Energy Agency</i>
GW	GigaWatts
MW	MegaWatts
kW	QuiloWatts
PROINFA	Programa de Incentivo s Fontes de Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
UHR	Usina Hidrelétrica Reversível
UHE	Usina Hidrelétrica
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Tema	12
1.1.1	Delimitação do Tema.....	13
1.2	Problema e premissas	13
1.3	Objetivos	14
1.3.1	Objetivo Geral.....	14
1.3.2	Objetivos Específicos	14
1.4	Justificativa	14
1.5	Procedimentos metodológicos	15
1.6	Estrutura do trabalho	15
2	MÁQUINAS ELÉTRICAS APLICADAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA	16
2.1	Introdução às máquinas elétricas	16
2.2	Energia hidráulica	17
2.2.1	Histórico.....	17
2.2.2	Energia hidráulica na geração de energia elétrica.....	18
2.2.3.	Um panorama mundial da utilização da Energia Hidráulica	21
2.3	Energia eólica	25
2.3.1	Histórico.....	25
2.3.2	Tecnologias Utilizadas.....	25
2.3.3	Regime dos Ventos e Limitações da Linha de Consumo	27
2.3.4	Energia Eólica no Brasil e no Mundo.....	30
2.4	Usinas reversíveis	31
2.4.1	Introdução e breve histórico das UHRs	31
2.4.2	Funcionamento das Usinas Reversíveis.....	32
3	ANÁLISE DE DESPACHO DE GERAÇÃO	37
3.1	Definição do modelo proposto	37
4	RESULTADOS OBTIDOS	42
4.1	Cenário 1	42
4.2	Cenário 2	43
4.3	Cenário 3	45
4.4	Análise de resultados	47
5	CONCLUSÕES	50
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema

A partir da década de 90, o setor elétrico brasileiro passou por duas grandes mudanças: a primeira, com a privatização de grande parte das companhias operadoras e a instituição da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que tem como função regular a geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, fiscalizar, excluir possíveis divergências entre os agentes e os consumidores e promover as atividades para a concessão de serviços de energia elétrica e a segunda, a introdução de um Novo Modelo do Setor Elétrico, a fim de garantir a confiabilidade e segurança do Sistema Interligado Nacional (ANEEL, 2019).

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é um sistema composto, em sua maioria, de usinas hidrelétricas, termelétricas e eólicas e dividido em quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte, sendo o subsistema Sudeste/Centro-Oeste o maior consumidor de energia elétrica do país (ONS, 2019).

A capacidade instalada do SIN é composta principalmente de usinas hidrelétricas distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas do Brasil. Como há poucos sistemas isolados, a interconexão facilita a transferência de energia entre os subsistemas e permite a exploração da diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias (ONS, 2019). Os empreendimentos hidrelétricos respondem por cerca de 109.119 MW (MegaWatts) e 60,28% de toda a capacidade de geração instalada do país (ONS, 2022).

Contudo, um sistema tão dependente dos recursos hídricos pode entrar em crise quando há falta de chuvas. Em 2014 e 2015 na região Sudeste por exemplo, a maior parte da estação chuvosa do período transcorreu com valores de chuva inferiores à média histórica da região. Com isso, os reservatórios hidrelétricos que abastecem a região, como a do Sistema Cantareira que supre a cidade de São Paulo, operaram, no período, com valores mínimos, acarretando um aumento de até 25% das tarifas elétricas em 2015 (MARENGO *et al.*, 2015).

Desde a implantação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a geração de energia elétrica por meio de parques eólicos apresentou um expressivo crescimento, ultrapassando a marca de 22.214 MW de

capacidade instalada, patamar superior a uma usina de Itaipu, segunda maior hidrelétrica do mundo em capacidade instalada e maior hidrelétrica brasileira (ONS, 2022). O alto fator de capacidade se comparado com outras fontes intermitentes, 36% (MME, 2015), os incentivos fiscais e a necessidade de diversificação da matriz energética brasileira contribuem para a competitividade das usinas eólicas no Brasil.

A implementação de novas fontes de energia no Brasil é necessária, visto que um sistema que depende majoritariamente da incidência de chuvas pode facilmente entrar em crise. Assim, este estudo visa a combinar sistemas hidrelétricos e eólicos na utilização de usinas reversíveis de forma a otimizar o despacho de geração e aumentar a confiabilidade do SIN.

1.1.1 Delimitação do Tema

Estudo sobre a utilização de usinas hidrelétricas reversíveis com bombas alimentadas por geração eólica para melhoria do despacho hidrotérmico. O trabalho partiu da análise das máquinas elétricas e do impacto no sistema com a inserção de Usinas Hidrelétricas Reversíveis.

1.2 Problema e premissas

A reduzida incidência de chuvas acarreta uma crise na segurança energética do país, trazendo incertezas para as atividades econômicas – indústria, comércio e serviços para a população (GALVÃO; BERMANN; 2015). Dessa forma, novas fontes de energia são necessárias, as quais podem complementar e aumentar a produção de energia.

O Brasil possui 12% da água doce superficial da Terra, tendo um dos maiores potenciais hidrelétricos do mundo (ANA, 2017). Em 2001, o primeiro Atlas do Potencial Eólico Brasileiro estimou o potencial eólico brasileiro em 143 GW, considerando torres de até 50 m de altura (ANEEL, 2008). Assim, este estudo partiu dos impactos econômicos causados pela seca e da percepção do potencial hidrelétrico e eólico do país.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Estudo preliminar que busca verificar o impacto no despacho fornecido às Usinas Hidrelétricas Reversíveis com a utilização de geração eólica e na curva de custos de geração com base no subsistema Nordeste.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para garantir o cumprimento do objetivo principal, são necessárias algumas etapas para a execução do escopo apresentado, sendo elas:

- Análise das máquinas elétricas;
- Verificar o funcionamento do despacho de geração hidrotérmico do SIN;
- Avaliar os modelos regulatórios do Brasil
- Averiguar o impacto no despacho hidrotérmico com a inserção das usinas reversíveis.

1.4 Justificativa

Para o Sistema Elétrico Brasileiro, extremamente dependente da geração hidrelétrica, a redução dos níveis de precipitação com a consequente redução das afluições naturais dos reservatórios acarreta a necessidade de recorrer à geração termelétrica (GALVÃO; BERMANN; 2015).

Contudo, a energia proveniente das usinas termelétricas possui um custo de geração maior, que aumentam os valores das tarifas repassadas aos consumidores.

Diante disso, faz-se necessária a mudança gradual da matriz energética brasileira, com a inclusão de outras alternativas de geração que podem auxiliar a reduzir o risco de crise energética.

A implementação de Usinas Reversíveis poderia reduzir a dependência da incidência de chuvas, visto que seria possível reabastecer os reservatórios das Hidrelétricas por meio de bombas alimentadas pela energia gerada pelos aerogeradores.

A Usina Hidrelétrica proposta seria composta por dois reservatórios, um superior e um inferior, onde o nível do reservatório superior seria controlado por meio de bombas reversíveis com o auxílio do reservatório inferior.

1.5 Procedimentos metodológicos

Para a execução desta dissertação foi necessária, primeiramente, a análise das máquinas elétricas, de modo a identificar as particularidades dos geradores eólicos e hidrelétricos, além de motores utilizados no bombeamento de água. Dessa maneira, artigos científicos, pesquisas bibliográficas, dissertações e teses serviram de base para o estudo do sistema proposto.

Além disso, foram utilizados os boletins de operação disponibilizados pelo ONS para a verificação do despacho das usinas presentes no sistema com a utilização do software Excel para a plotagem das curvas dos cenários propostos.

1.6 Estrutura do trabalho

Para analisar o incremento do despacho de geração às Usinas Hidrelétricas com a utilização da geração eólica, este estudo foi dividido da seguinte forma:

Capítulo 1 - Introdução: Introduz o tema, apresenta as premissas e justificativas do trabalho.

Capítulo 2 – Máquinas Elétricas aplicadas na geração de energia: apresenta os conceitos das máquinas elétricas utilizadas e o princípio de funcionamento das Usinas Hidrelétricas, Parques Eólicos e Usinas Reversíveis.

Capítulo 3 – Análise de despacho de geração: Define como o sistema foi modelado.

Capítulo 4 – Resultados Obtidos: Apresenta os resultados de geração, comparando o despacho das Usinas Hidrelétricas e Parques Eólicos ligados diretamente no SIN com a utilização de Usinas Reversíveis.

Capítulo 5 - Conclusões: Discussões finais sobre o incremento de despacho de geração no sistema proposto.

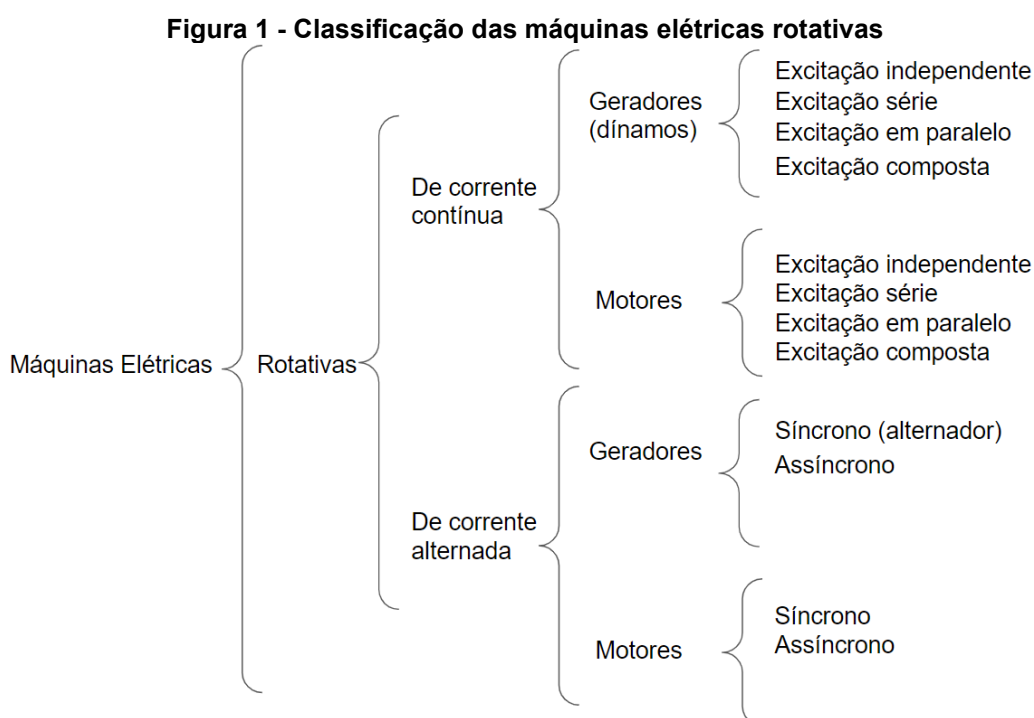
2 MÁQUINAS ELÉTRICAS APLICADAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA

2.1 Introdução às máquinas elétricas

Máquinas elétricas são dispositivos de conversão de energia e podem ser divididas em geradores, que convertem a energia mecânica em energia elétrica, e motores, convertem a energia elétrica em energia mecânica. Como as máquinas elétricas podem fazer a conversão em ambos os sentidos, elas podem funcionar como motor e como gerador. A maior parte dos motores converte um tipo de energia em outro por meio de um campo magnético (CHAPMAN, 2013).

Os motores elétricos estão presentes tanto em estabelecimentos residenciais quanto industriais e podem ser encontrados em eletrodomésticos, esteiras, elevadores, máquinas industriais, compressores, tornos e tantos outros equipamentos. A energia elétrica que alimenta esses motores é fornecida por um gerador.

A respeito da classificação das máquinas elétricas, essas são divididas em dois grupos, rotativas e não rotativas. O transformador faz parte do segundo grupo, enquanto os motores e geradores fazem parte do primeiro. As máquinas elétricas rotativas ainda são subdivididas em dois grupos, máquinas de corrente contínua e máquinas de corrente alternada. A Figura 1 ilustra a classificação das máquinas elétricas rotativas.



Fonte: Autoria própria (2022)

As máquinas elétricas rotativas são compostas por um estator e um rotor. O rotor é a parte móvel, ao passo que o estator é a parte fixa. O rotor é montado sobre um eixo que fica livre para girar entre os polos do estator. Em geral, existem enrolamentos na parte fixa e na parte móvel que conduzirão a corrente elétrica. Para os enrolamentos do rotor, a alimentação é feita por meio de escovas de grafite e anéis coletores (LEÃO, 2016). A maior parte das máquinas em funcionamento atualmente são de corrente alternada e essas são divididas em motores e geradores síncronos e assíncronos.

As máquinas síncronas são amplamente utilizadas na geração de energia elétrica, sendo utilizadas como gerador ou como compensador de potência reativa. Mais de 99% de toda a potência é gerada pelas máquinas síncronas. Elas operam com velocidade constante em regime permanente senoidal, usualmente convertendo energia mecânica em energia elétrica nas usinas (TECNOGERA, 2016).

As máquinas síncronas são assim denominadas pois a frequência da tensão gerada é diretamente relacionada com a frequência de rotação da máquina e ao seu número de polos. Já nas máquinas assíncronas, a frequência de rotação não é proporcional à frequência da corrente elétrica em decorrência do escorregamento (TECNOGERA, 2016).

Os geradores síncronos são mais aplicados em usinas hidrelétricas, pois seus aspectos construtivos permitem que a frequência seja constante, independente da carga. Ademais, os geradores síncronos são mais eficientes que os geradores assíncronos quando utilizados em larga escala e são mais empregados em sistemas isolados, como em hospitais e indústrias (TECNOGERA, 2016).

2.2 Energia hidráulica

2.2.1 Histórico

O uso da energia hidráulica foi uma das primeiras formas de substituição do trabalho animal pelo mecânico. No Egito Antigo, por exemplo, as rodas d'água eram utilizadas para mover pedras de moagem. Já no século IX, a energia proveniente dos rios era aproveitada para preparar cerveja e moer alimentos e pigmentos de tinta (ENEL, 200-?).

A construção de usinas e barragens hidrelétricas iniciou-se a partir da Revolução Industrial. Em 1882, a primeira usina hidrelétrica do mundo foi construída no Rio Fox, na cidade de Appleton nos Estados Unidos. A Usina Hidrelétrica (UHE) contava com uma potência instalada de 12,5 kW (QuiloWatts) (PEREIRA, 2015).

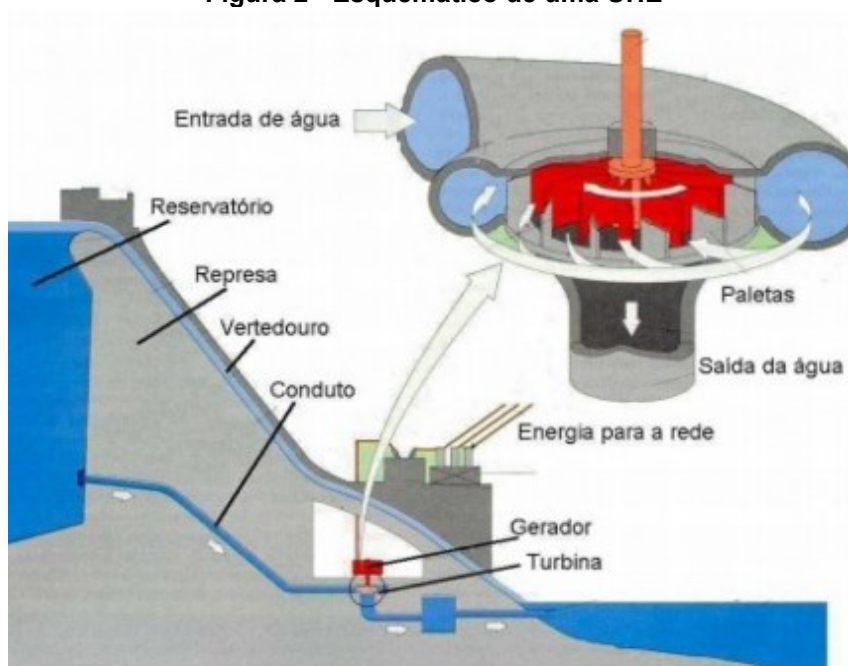
No Brasil, a primeira hidrelétrica construída foi a de Ribeirão do Inferno, inaugurada em 1883, com 0,5 MW de potência instalada. A UHE contava com uma linha de transmissão de 2 km (ANEEL, 2008). Naquele momento, o complexo possuía uma das maiores linhas de transmissão do mundo.

Em 1889, inaugurou-se a hidrelétrica de Marmelos em Juiz de Fora, Minas Gerais, considerada a primeira usina de grande porte construída no Brasil. A hidrelétrica de Marmelos contava com uma capacidade instalada de 4 MW (GOMES, 2013). Inicialmente, a energia gerada pelas usinas hidrelétricas era destinada exclusivamente para o abastecimento de uma indústria, mina ou cidade. Na atualidade, o Sistema Interligado Nacional conta com cerca de 200 UHEs (ONS, 2022).

2.2.2 Energia hidráulica na geração de energia elétrica

Uma usina hidrelétrica é composta basicamente por uma barragem, vertedouro, conduto forçado, casa de força (onde está alocado o conjunto turbina-gerador) e um canal para saída de água (PEREIRA, 2015). A Figura 2 mostra o esquemático de uma UHE.

Figura 2 - Esquemático de uma UHE



Fonte: Infoescola (200-?)

A barragem tem como função represar a água e criar um desnível no rio, a fim de armazenar energia potencial. O fluxo de água então é canalizado por um conduto forçado, que conduz a água até a turbina, o que faz com que essa se movimente. A turbina então converte a energia hidráulica em energia mecânica, com eficiência de até 90%, e movimenta o rotor do gerador, que por sua vez converte a energia mecânica em energia elétrica. Após passar pela turbina, a água é retornada ao rio (QUEIROZ et al, 2013). O vertedouro tem como função permitir a passagem de água à jusante do rio quando os reservatórios estão em sua capacidade máxima.

As usinas hidrelétricas também podem ser a fio d'água, usinas que não possuem reservatório (grandes áreas alagadas). Ou seja, o curso do rio é preservado. Contudo, isso faz com que a capacidade de geração de energia desse modelo seja afetada em períodos de estiagem.

As vantagens de uma usina hidrelétrica são: fonte renovável (água), confiabilidade, durabilidade, flexibilidade e alto rendimento se comparado com outras usinas. A energia elétrica gerada pelas usinas depende de três variáveis: potência instalada, fator de capacidade e o período considerado e pode ser calculada por meio da equação (GOMES, 2013):

$$E_{elP} = P * FC * T \quad (1)$$

Onde:

EelP = energia elétrica produzida;

P = potência instalada;

FC = fator de capacidade médio;

T = período considerado.

A potência gerada pelo conjunto turbina-gerador é definida de acordo com a seguinte equação (GOMES, 2013):

$$P = \rho * g * H * Q * \eta \quad (2)$$

Onde

ρ = densidade da água;

g = aceleração da gravidade;

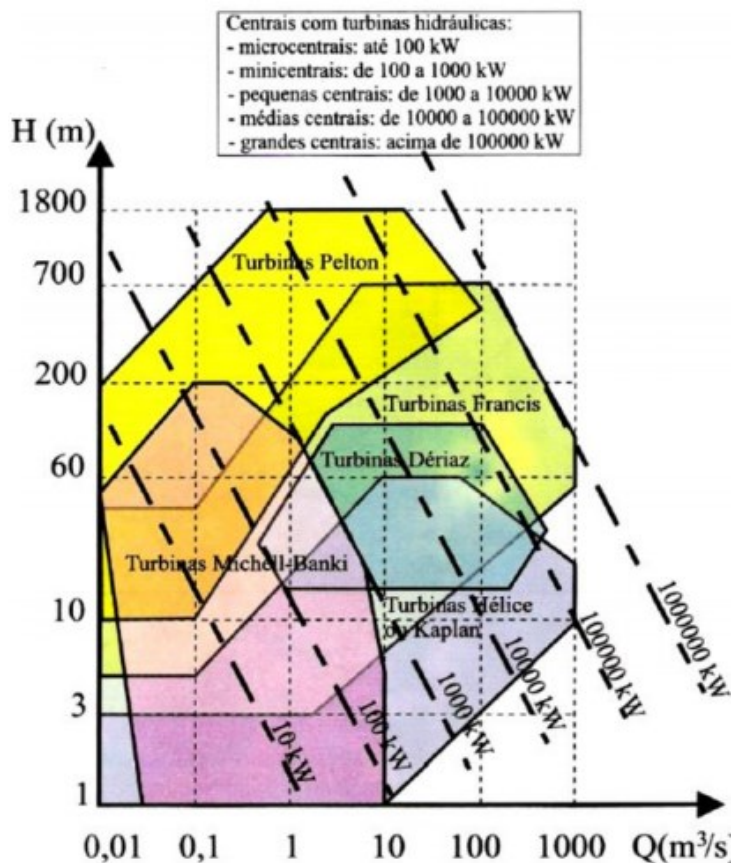
H = queda líquida;

Q = vazão turbinada;

η = rendimento do conjunto turbina-gerador.

As turbinas utilizadas nas UHEs têm os mais variados tipos de formato e tamanho. A Figura 3 apresenta tipos de turbina em função da altura de queda, vazão e potência do parque gerador.

Figura 3 - Aplicação de turbinas hidráulicas

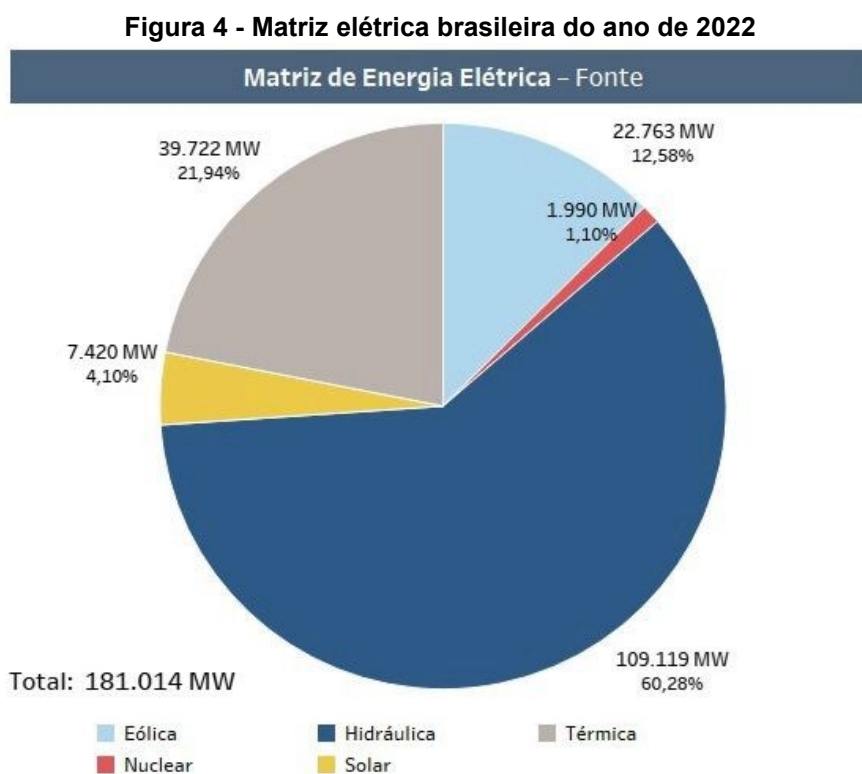


Fonte: HENN (2012)

O modelo mais indicado para baixas quedas, de 10 m a 70 m, é a turbina tipo Kaplan. Para elevadas quedas, 200 m à 1500 m, é o tipo Pelton. No Brasil, os projetos de média queda são os mais comuns, como a da Usina Hidrelétrica de Itaipu. Nesse sentido, a turbina Francis é o modelo mais utilizado, pois pode ser utilizada tanto em locais com baixa e alta queda. (ANEEL, 2008).

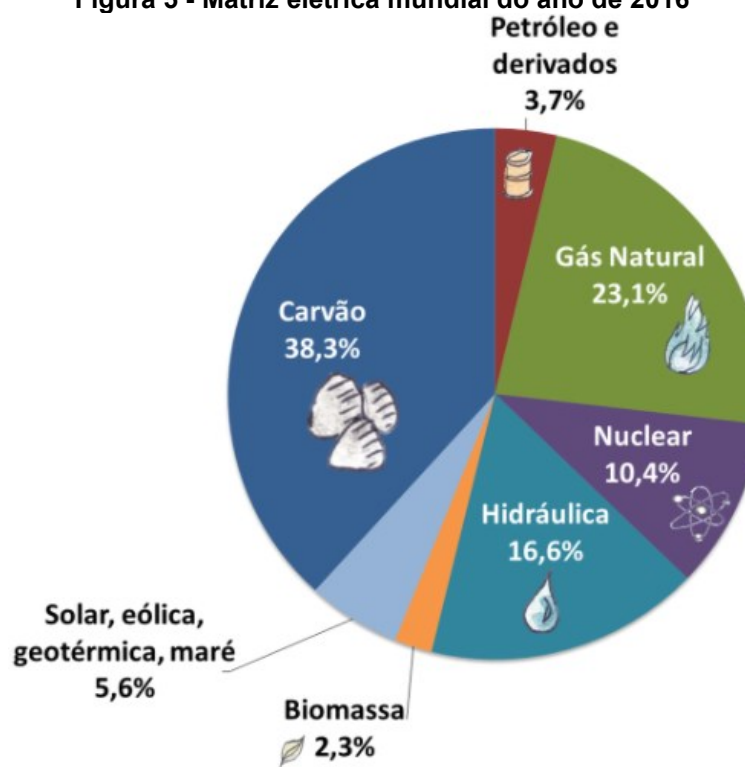
2.2.3. Um panorama mundial da utilização da Energia Hidráulica

A Figura 4 mostra a composição da matriz energética brasileira em 2022. É possível observar que a participação hidrelétrica é predominante, com uma contribuição de 60,28% (ONS, 2022).



Fonte: ONS (2022)

Segundo o IEA (2018), a matriz elétrica mundial no ano de 2016 tinha como maior fonte de energia o carvão, compondo 38,3% do total, enquanto as hidrelétricas correspondiam à apenas 16,6% de utilização. Isso mostra que a matriz elétrica brasileira, quando comparada à matriz global, está à frente na utilização de fontes renováveis de energia. Os dados são apresentados na Figura 5.

Figura 5 - Matriz elétrica mundial do ano de 2016

Fonte: IEA (2018)

No panorama mundial, o Quadro 1 apresenta a produção acumulada das maiores usinas hidrelétricas do mundo. Itaipu Binacional, localizada entre o Brasil e o Paraguai, é a hidrelétrica que possui maior produção acumulada, contando com 2,68 bilhões de MWh desde o início de sua operação. No quesito de maior capacidade instalada, Três Gargantas, na China, lidera a posição com cerca de 22.400 MW e é seguida por Itaipu com 14.000 MW.

Quadro 1 - Produção acumulada das maiores UHEs em bilhões de MWh.

Usina	País	Início da Operação	Produção acumulada em bilhões de MWh
Itaipu Binacional	Brasil-Paraguai	1984	2,68
Guri	Venezuela	1978	1,56
Três Gargantas	China	2006	1,28
Grand Coulee	Estados Unidos	1941	1,13
Churchill Falls	Canadá	1971	1,12
Sayano-Shushenskaya	Rússia	1978	1,09
Krasnoyarsk	Rússia	1971	0,98
Tucuruí	Brasil	1984	0,96
Robert-Bourassa	Canadá	1979	0,90

Fonte: ITAIPU Binacional (2020)

Em relação à produção anual, Itaipu possui o recorde mundial com 103 milhões MWh/ano, alcançado no ano de 2016. Três Gargantas aproxima-se desse número. Em 2018, a usina chegou a gerar 101,6 milhões MWh/ano (ITAIPU, 2020).

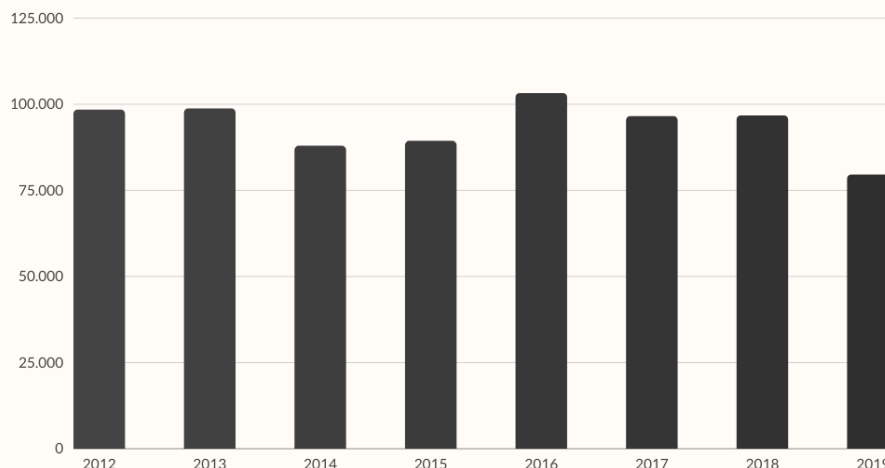
O projeto de Itaipu começou em 1962, com os estudos para aproveitamento hidrelétrico de Sete Quedas. Contudo, a primeira unidade geradora da UHE começou a produzir energia apenas em 1984 e somente em maio de 2007 entraram em operação todas as 20 unidades geradoras. Segundo estimativas, o acumulado produzido de energia por Itaipu de 1984 até 2023 será de 3 bilhões de MWh. (ITAIPU, 2020).

Itaipu Binacional fornece 11,3% da energia elétrica consumida no Brasil e 88,1% da energia elétrica consumida no Paraguai atualmente (ITAIPU, 2020). O ano de 2019 marcou o período de maior seca na história da usina. A Figura 6 apresenta a produção anual de Itaipu entre 2012 e 2019.

Figura 6 - Produção anual de energia na UHE Itaipu Binacional

PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA - GWh

2012 à 2019



Fonte: Adaptado de Itaipu Binacional (2020)

Pelo fato de a usina de Itaipu ser do tipo fio d'água, os períodos de seca afetam diretamente sua produção de energia.

Em 1994, estimou-se que o potencial hidrelétrico brasileiro era de aproximadamente 260.000 MW (ELETROBRÁS, 1994). Se considerar as tecnologias atuais, o potencial hidrelétrico brasileiro pode ser ainda maior. No ano de 2022, a capacidade instalada das hidrelétricas no país é de cerca de 109.119 MW (ONS, 2022), 41,97% do potencial estimado. O Quadro 2 apresenta o potencial hidrelétrico brasileiro por região hidrográfica estimado no ano de 1994.

Quadro 2 - Potencial hidrelétrico brasileiro por região hidrográfica

Região hidrográfica	Potencial hidrelétrico (MW)	% estimado
Amazonas	105.410	40,5
Paraná	60.378	23,2
Tocantins	27.540	10,6
São Francisco	26.319	10,1
East Atlantic	14.092	5,4
Uruguai	13.337	5,1
Southeast Atlantic	9.617	3,7
North/Northeast Atlantic	3.402	1,3
TOTAL	260.095	100

Fonte: ELETROBRAS (1999)

A construção de usinas hidrelétricas é marcada por impactos ambientais e sociais. A hidroeletricidade é uma energia renovável, pois utiliza a energia da água

para gerar eletricidade, sem diminuir sua quantidade. Contudo, o desgaste da região alagada e do solo contribuem para o efeito estufa e para a perda da biodiversidade na região.

2.3 Energia eólica

2.3.1 Histórico

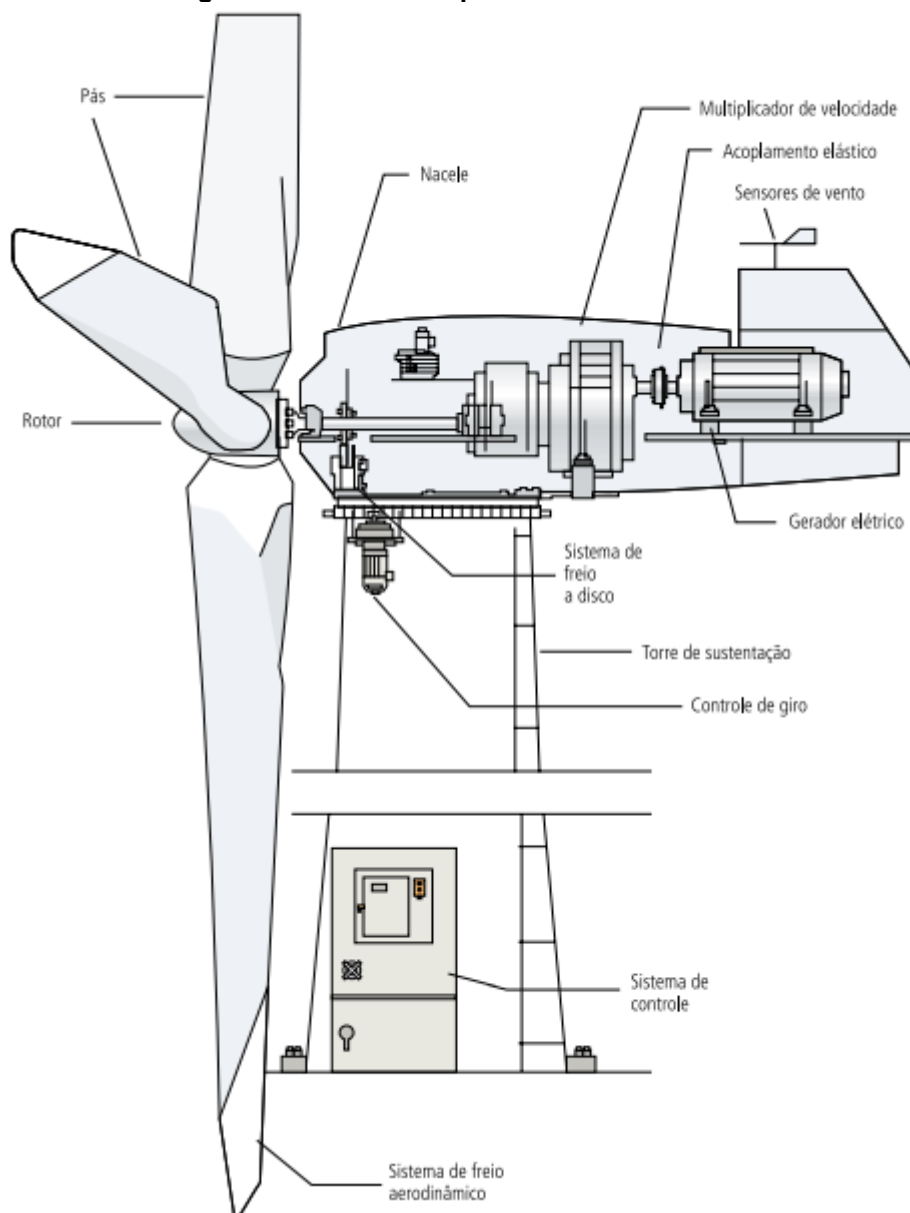
O vento é utilizado como fonte de energia pela humanidade há mais de 3000 anos, sendo os moinhos de vento para moagem de grãos e bombeamento de água em atividades agrícolas como as primeiras aplicações da energia eólica (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2017).

Durante a década de 70, a crise do petróleo derivada da queda na oferta da principal fonte de energia mundial evidenciou a necessidade de uma alternativa energética e a energia eólica surge como matriz viável para produção de energia. Ao longo da década, os barris de petróleo passaram de U\$ 2,00 a U\$ 35,00 em 1979 (LIMA; SANTOS; MOIZINHO; 2018).

Nesse contexto de alta instabilidade do petróleo, a primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada em 1976, na Dinamarca, e tinha capacidade de geração de cerca de 30 a 55 kW, capacidade bastante reduzida se comparada com as turbinas fabricadas atualmente que ultrapassam 1 MegaWatt (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2017).

2.3.2 Tecnologias Utilizadas

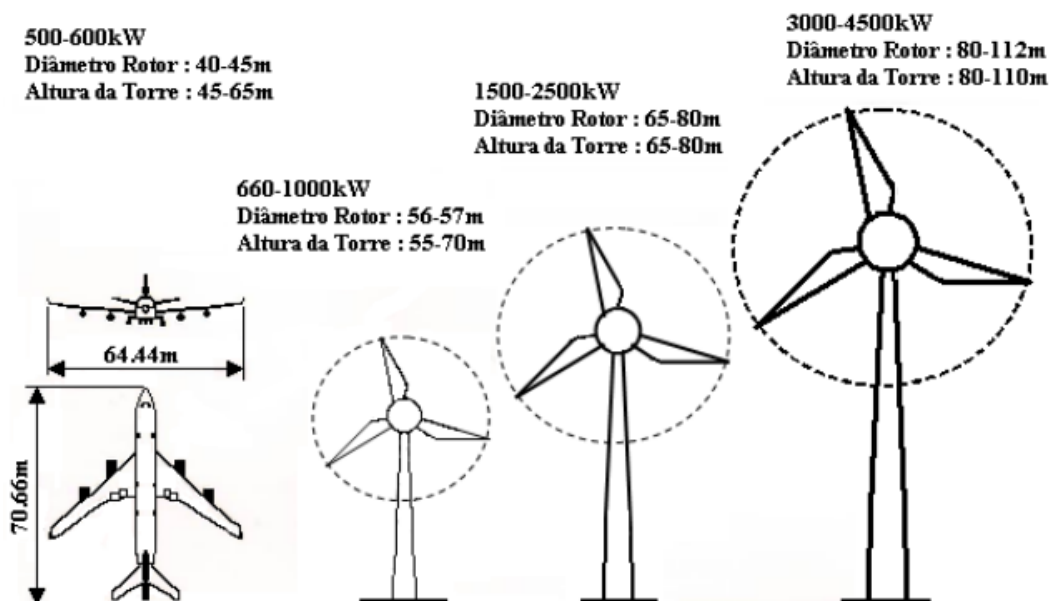
Quando a energia cinética dos ventos começou a ser utilizada a fim de gerar energia elétrica, diversas turbinas surgiram, com eixo horizontal, eixo vertical, com apenas uma pá, com duas e três pás, gerador de indução, gerador síncrono, entre outros. Contudo, com o passar do tempo, a turbina com eixo de rotação horizontal, três pás, alinhamento ativo, gerador de indução e estrutura não flexível, consolidou-se como o projeto de maior utilização comercial (ANEEL, 2003). A Figura 7 ilustra o desenho esquemático de uma turbina eólica.

Figura 7 - Desenho esquemático de uma turbina eólica

Fonte: ANEEL (2003)

A turbina eólica aproveita a energia cinética dos ventos por meio das pás que estão ligadas ao rotor e a transforma em energia mecânica de rotação. O eixo do rotor aciona o gerador elétrico que transforma a energia mecânica de rotação em energia elétrica. A Figura 8 apresenta as dimensões típicas das turbinas eólicas no mercado comparando com as dimensões de um Boeing 747.

Figura 8 - Dimensões típicas das turbinas eólicas

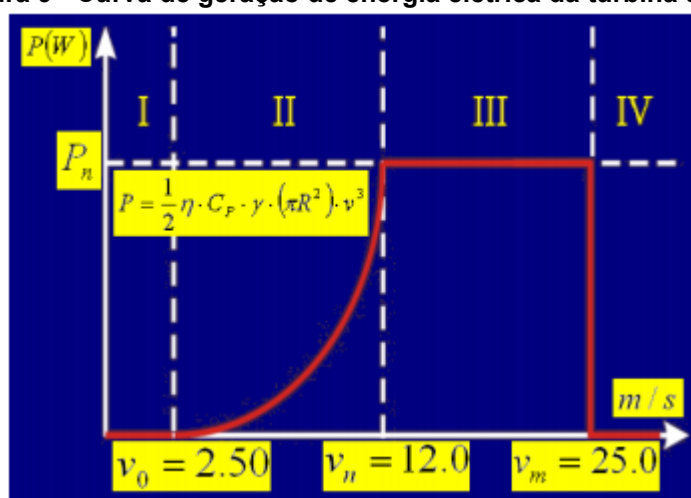


Fonte: RUNCOS, F. et al. (200-?)

2.3.3 Regime dos Ventos e Limitações da Linha de Consumo

A geração de energia elétrica por meio das turbinas eólicas inicia-se com velocidades de vento de 2,5m/s. Abaixo disso, não é justificável o aproveitamento da energia dos ventos. E como a velocidade do vento é variável, a turbina eólica não consegue manter a rotação do eixo constante e, portanto, manter a frequência da rede sem o auxílio de um controlador de velocidade (RUNCOS, F. et al., 200-?). A Figura 9 apresenta a curva de geração elétrica extraída da turbina eólica.

Figura 9 - Curva de geração de energia elétrica da turbina eólica



Fonte: RUNCOS, F. et al. (200-?)

Dessa forma, pode-se observar por meio da Figura 9 que na região I não há geração considerável de energia elétrica para velocidades de vento de até

2,5m/s, o que não justifica seu aproveitamento, na região II, a potência varia em função da velocidade e na região III, a potência é mantida constante. Para ventos superiores a 25 m/s, o sistema controlador de velocidade é acionado e a turbina retirada do sistema, a fim de manter a frequência da rede (RUNCOS, F. et al., 200-?).

Um empreendimento eólico está sujeito ao regime dos ventos do local de instalação, de modo que mesmo tendo uma grande potência instalada, nenhuma energia elétrica poderá ser gerada caso os ventos não atinjam a velocidade mínima. Uma matriz energética dependente inteiramente de um sistema eólico torna-se bastante vulnerável. Uma das formas de se medir a capacidade de geração de um parque eólico é por meio do valor do Fator de Capacidade (FC), calculado a partir da seguinte equação:

$$FC = \frac{E_a}{P_n T} \quad (3)$$

Onde:

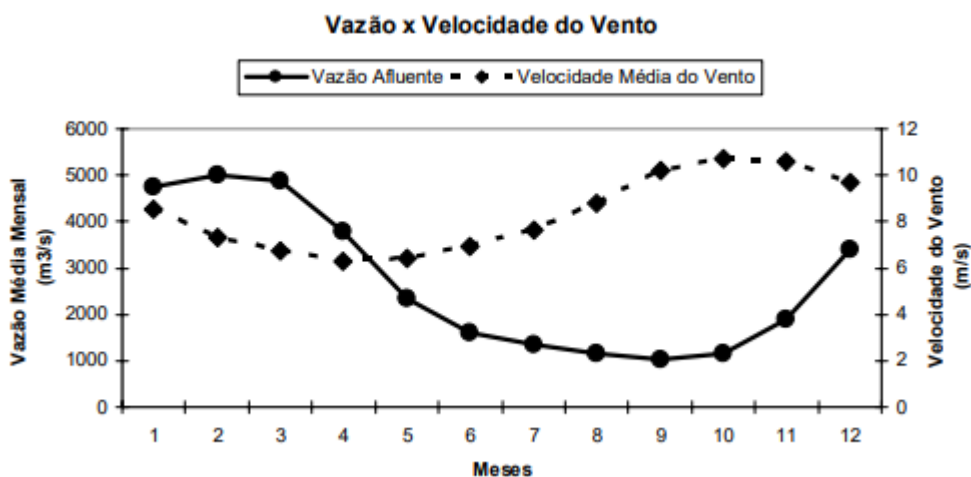
E_a = quantidade de energia produzida no intervalo de tempo;

T = Intervalo de tempo;

P_n = soma das potências nominais dos aero geradores do parque eólico;

Ou seja, na matriz de despacho do sistema, os parques eólicos não podem ser alocados na base do sistema e nem como suprimentos de ponta, pois não garantem a disponibilidade. A Figura 10 compara a vazão média mensal das hidrelétricas com a velocidade dos ventos ao longo do ano no Brasil.

Figura 10 – Comparação das vazões afluentes com a média mensal de velocidade do vento

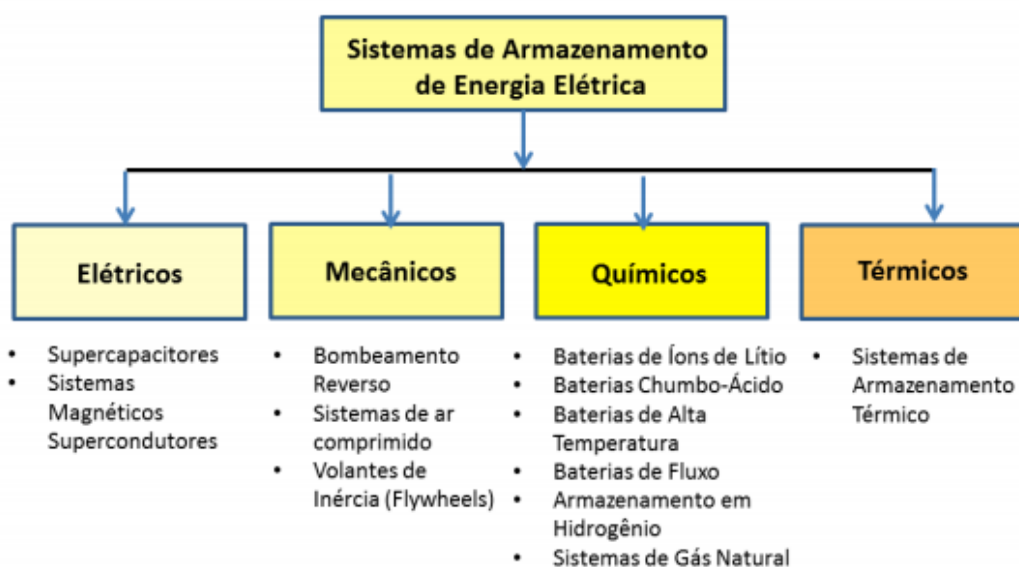


Fonte: Marinho e Aquino (2007)

Dessa forma, pode-se verificar na Figura 10, a complementariedade da geração eólica e geração hidráulica na matriz energética brasileira. O pico de geração eólica ocorre no período de menor vazão dos reservatórios das hidrelétricas brasileiras.

Há também várias tecnologias disponíveis e em diversos estágios de maturidade de armazenamento de energia que podem ser usadas para diminuir o impacto da intermitência dos ventos. De qualquer maneira, em todas essas tecnologias há uma perda de energia no processo, o que determinará a eficiência do sistema de armazenamento. A Figura 11 apresenta sistemas de armazenamento de energia elétrica.

Figura 11 - Sistemas de armazenamento de energia elétrica



Fonte: Brandão e Bueno (2016)

Dentre os sistemas de armazenamento de energia elétrica apresentados na Figura 11, destacam-se o bombeamento reverso, as baterias de fluxo e armazenamento em hidrogênio para o estoque de energia proveniente de sistemas intermitentes, como parques eólicos e solares.

O sistema de bombeamento reverso utiliza turbinas-bombas posicionadas junto ao reservatório inferior, bombeando água para um reservatório superior, essas usinas são chamadas de usinas reversíveis e são o objeto deste estudo. As baterias de fluxo conseguem armazenar médias e grandes quantidades de energia por semanas e são mais viáveis para essa demanda do que os outros tipos de baterias. Já o armazenamento em hidrogênio apresenta uma eficiência máxima de 60% e

consegue armazenar em longo prazo (semanal, mensal e sazonal) a energia gerada pelas fontes intermitentes (BRANDÃO; BUENO, 2016).

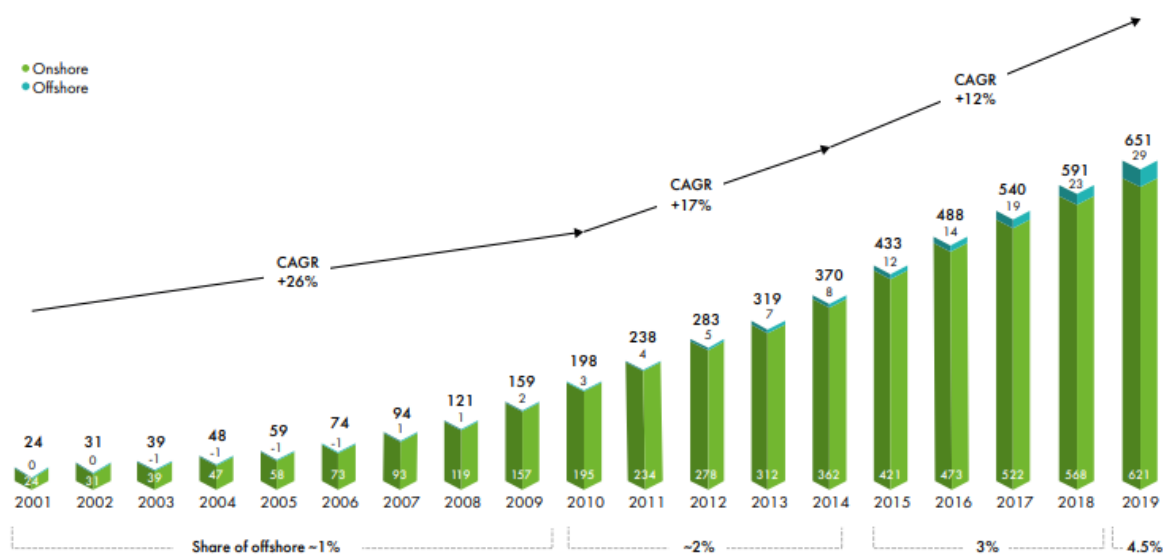
No Brasil, a principal forma de armazenar energia e mais viável é por meio dos reservatórios das Usinas Hidrelétricas, visto que o Sistema Interligado Nacional é composto majoritariamente por essas usinas (BRANDÃO; BUENO, 2016).

2.3.4 Energia Eólica no Brasil e no Mundo

A geração de energia eólica cresceu bastante nas últimas duas décadas, como pode-se observar na Figura 12. Segundo a *Global Wind Energy Council* (2020), a potência instalada de energia eólica nas Américas cresceu 221,7% nos últimos 10 anos, de 46 GW para 148 GW. Em 2019, 13,427 GW foram instalados na região, 12% maior que o ano passado e o Brasil ocupa o quarto lugar entre os países que mais instalaram parques eólicos nas Américas. Na década de 2010, os investimentos mundiais em energia eólica apontaram um crescimento de 3,85%.

O IEA (2015) aponta que a energia eólica responde por grande parte do crescimento na geração de energia por fontes renováveis no mundo (34%), seguida por hidrelétricas (30%) e solar (18%). A Figura 12 aponta o crescimento de potência instalada em GW no mundo de energia eólica a partir do ano de 2001.

Figura 12 - Capacidade instalada no mundo de energia eólica em GW

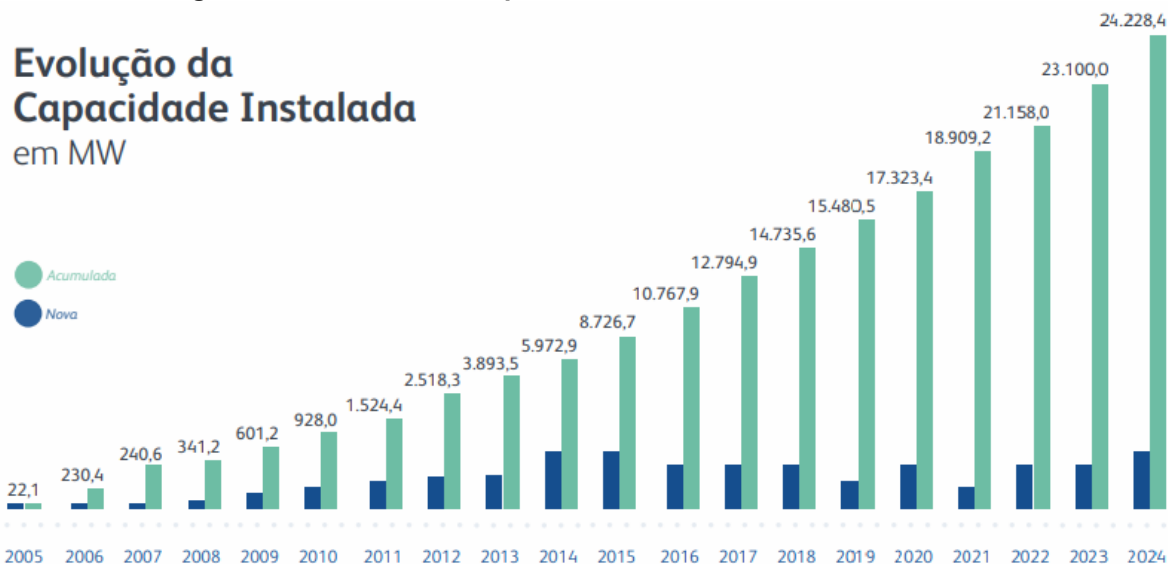


Fonte: GWEC Market Intelligence (2020)

Segundo a ABBEólica (2020), o Brasil possui cerca de 16 GW de capacidade instalada, dividida em 637 Parques Eólicos e corresponde a 9,7 % de toda a geração injetada no Sistema Interligado Nacional, sendo os cinco estados

com maior geração no período de 2019 a Bahia (16,83 TWh), Rio Grande do Norte (14,09 TWh), Piauí (6,02 TWh) e Rio Grande do Sul (5,26 TWh). A Figura 13 apresenta a evolução da capacidade instalada no Brasil em MW.

Figura 13 - Evolução da capacidade instalada no Brasil em MW



Fonte: ANEEL/ABEEólica (2020)

Em comparação com o cenário mundial, o Brasil ocupa a sétima posição no Ranking Mundial de capacidade eólica acumulada *onshore* (parques eólicos existentes em terra) (ABEEólica, 2020).

2.4 Usinas reversíveis

2.4.1 Introdução e breve histórico das UHRs

As primeiras usinas hidrelétricas reversíveis surgiram com o intuito de complementar as usinas de base, sendo elas as principais responsáveis pelo ajuste de potência nos sistemas elétricos existentes da época. Em geral, essas usinas possuíam unidades separadas para a geração e para o bombeamento de água dos reservatórios inferiores para os superiores. A primeira Usina Hidrelétrica Reversível do mundo entrou em operação em 1890, em Zurique, na Suíça (PINHEIRO, 2016).

A demanda de energia cresce cada vez mais, submetendo a rede elétrica dos países a variações de frequência e tensão. As usinas hidrelétricas reversíveis podem atuar nesse cenário, equilibrando as faltas e excessos de energia. Enquanto as usinas eólicas e solares estão sujeitas às variações do ambiente, as usinas reversíveis conseguem entregar potência à medida que o sistema exige, sendo também uma opção viável economicamente.

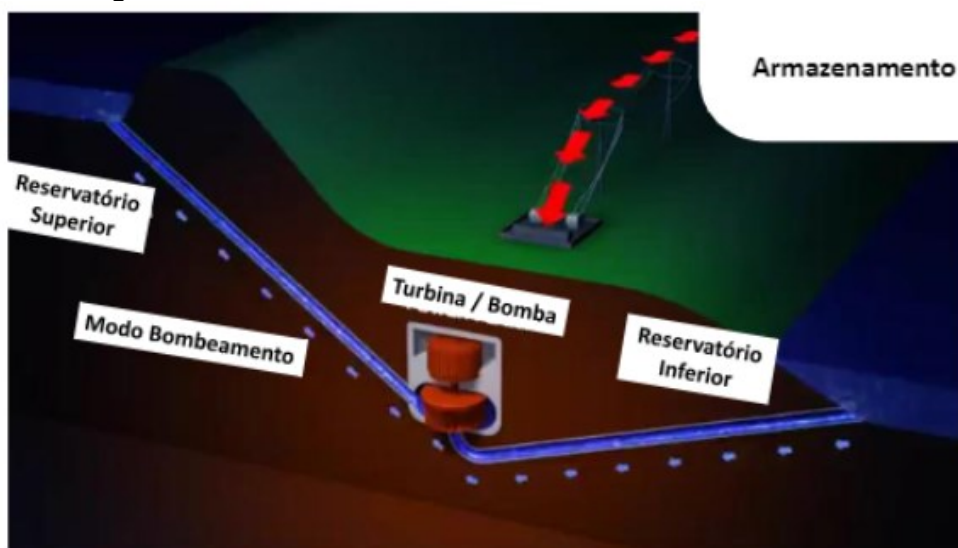
No Brasil, utilizam-se as usinas termelétricas para compensar os balanços do SIN em períodos de estiagem extensos. Além da energia gerada pelas termelétricas ser muito custosa, aquelas que utilizam o diesel, por exemplo, ainda estão submetidas ao aumento dos preços desse combustível (SIL, 2017).

O pouco interesse pelas UHRs por parte dos investidores no Brasil se dá pela falta de incentivos fiscais para esse tipo de usina no país. Existem mais de 140 GW de potência instalada de Usinas Reversíveis no mundo, onde as maiores UHRs estão nos EUA, China Japão e Europa Ocidental (VARELLA, 2018).

2.4.2 Funcionamento das Usinas Reversíveis

As usinas reversíveis possuem dois reservatórios, um superior e outro inferior. Quando há excedentes de energia, a água do reservatório inferior é bombeada para o reservatório superior e quando há demanda de energia, a água fornecida pelo reservatório superior é descarregada por meio de um conduto forçado até a turbina-bomba, que acionará o gerador e injetará potência na rede (VARELLA, 2018). A Figura 14 ilustra o funcionamento de uma Usina Hidrelétrica Reversível.

Figura 14 - Funcionamento de uma usina hidrelétrica reversível



Fonte: Alstom (2013)

A turbina-bomba é uma máquina elétrica que pode ser operada tanto como bomba, quanto como turbina. A função da turbina-bomba é definida de acordo com o sentido de operação. Quando acionadas pela força hidráulica, funcionam como turbina para gerar energia elétrica e quando acionadas por um motor, funcionam

como bomba, girando no sentido contrário ao da geração (VARELLA, 2018). Para realizar a operação de bombeamento, é possível aproveitar os excedentes de energia gerados pelas usinas eólicas e solares, visto que sua disponibilidade é variável, característica intrínseca dessas fontes de energia.

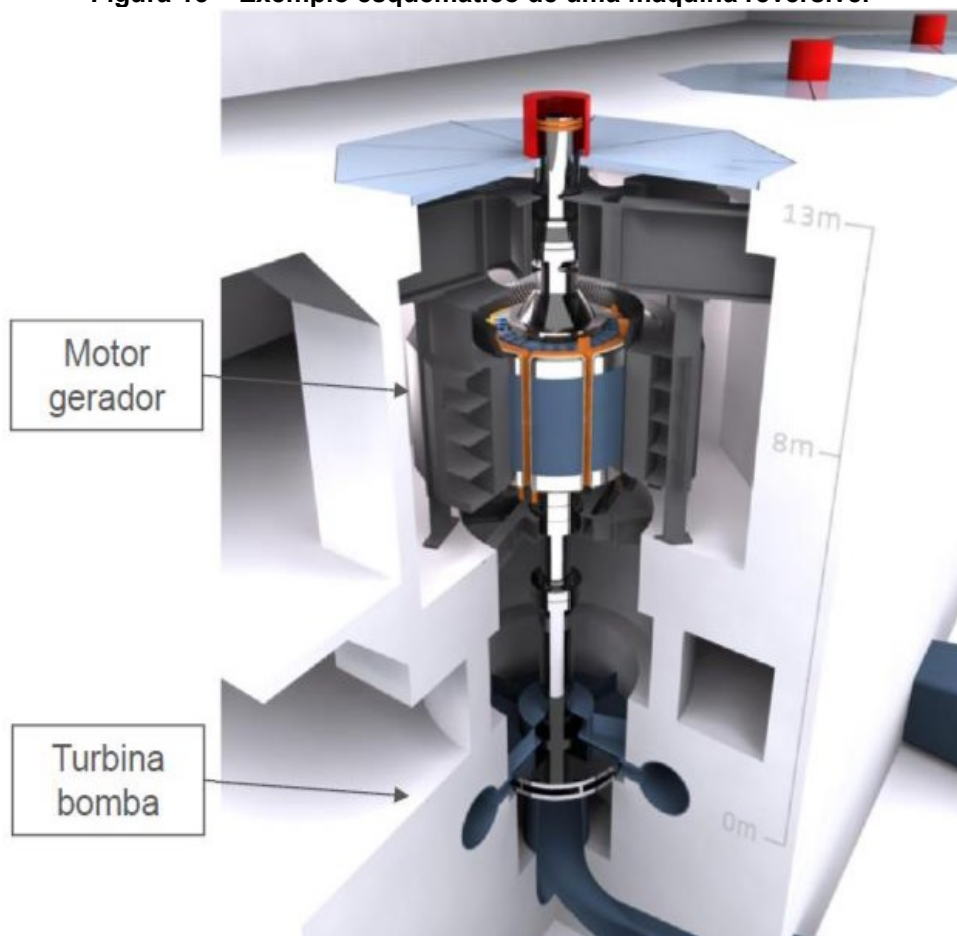
Os reservatórios das UHRs podem ser construídos de forma a depender ou não do leito de um rio. Nas usinas chamadas de "usinas por bombeamento puro" ou "circuito fechado", os reservatórios não dependem de um rio para seu funcionamento, a água flui de um reservatório para o outro por meio da gravidade e do bombeamento. Nesse caso, o sistema pode ter perdas por conta da evaporação da água e infiltrações. No caso das usinas com o reservatório no leito do rio, durante o dia elas funcionam como hidrelétrica e durante a noite, os excedentes de energia bombeiam a água para o reservatório mais alto (SCHREIBER, 1978).

A turbina geradora não precisa necessariamente estar próxima das bombas. É possível a configuração de geração e bombeamento distantes fisicamente, porém isso pode acarretar o aumento significativo dos custos do projeto da usina (CANALES; BELUCO; MENDES; 2015).

Em quedas maiores que 600 m, classificadas como alta queda, o modelo de turbina mais apropriado é o tipo Pelton, conforme descrito na seção 2.2.2, de modo que o sistema inclua três máquinas: turbina, motor-gerador e bomba. Para quedas menores que 600 m, a opção mais viável é a utilização de turbinas-bomba, que funcionam como bomba e como turbina, em momentos alternados. Para esse modelo, pode-se alternar o modo de operação dessas máquinas, funcionando como máquina síncrona na geração e máquina assíncrona no acionamento das bombas. O benefício dessa configuração é a possibilidade do fácil controle da velocidade de rotação da turbina, controlada de acordo com a disponibilidade de energia excedente gerada (CANALES; BELUCO; MENDES; 2015). As principais vantagens das turbinas-bomba funcionando como turbina são: custo baixo de fabricação e manutenção, não necessitam de manutenção especializada, instalação simples e peças encontradas com facilidade no mercado (LOPES, MARTINEZ; 2006).

A Figura 15 mostra o desenho de uma máquina reversível, turbina-bomba acoplada a um motor gerador.

Figura 15 – Exemplo esquemático de uma máquina reversível



Fonte: CRUZ (2018)

Além da capacidade de geração, as UHRs podem auxiliar na garantia de operacionalidade do SIN, definido pelo ONS como serviços ancilares. Na nota técnica “Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR): Desafios para inserção em mercados de energia elétrica” publicada pela EPE em 2021 são elencados os serviços oferecidos pelas UHRs. São eles:

- Nivelamento de carga: consumo de energia para o armazenamento em momentos de abundância e produção de energia em períodos de escassez;
- Provimento de inércia: atenuar e retardar o desvio de frequência devido a desequilíbrios entre geração e consumo;
- Reserva de potência para controle de frequência: contribuir para a manutenção da frequência da rede;
- Acompanhamento de carga: partida das unidades geradoras com maior antecedência até que o sistema atinja sua potência nominal;

- Redução de ciclos de unidades termelétricas: redução de ciclos de partida, parada e rampas de unidades termelétricas;
- Redução da carga mínima do sistema e suporte à expansão da geração inflexível: o consumo de energia das UHR no bombeamento pode auxiliar a manutenção da estabilidade do sistema em momentos de baixo consumo;
- Controle de reativos (controle de tensão): controle de potência reativa na rede, como é realizado pelas usinas hidrelétricas convencionais;
- Autorrestabelecimento: baixo consumo dos sistemas auxiliares necessários à partida e à velocidade de partida e sincronização das UHRs.

As UHRs possuem alguns problemas de operação, como a necessidade de mais manutenções ao longo do tempo se comparadas às hidrelétricas convencionais. A alternância entre os modos de operação da usina são a causa desse fato, visto que são acionadas mais vezes e o sentido de rotação é trocado com certa frequência. Tanto as UHEs quanto as UHRs estão submetidas a incidentes como vazamento nas barragens, falha das grades nas tomadas de água e inundação na casa de máquinas (CANALES; BELUCO; MENDES; 2015).

Na questão ambiental, as UHRs podem trazer situações negativas como eutrofização dos reservatórios quando não há adequação na renovação da água, aumento na turbidez da água, como também erosão e deslizamentos de terra, devido à constante alternância no nível de água dos reservatórios. Em contrapartida, pode-se citar os impactos positivos como o aumento do oxigênio na água e a redução do crescimento de algas azuis e verdes (CANALES; BELUCO; MENDES; 2015).

Há a possibilidade de converter as usinas hidrelétricas em usinas reversíveis, para isso é preciso que haja um reservatório próximo à usina, com um desnível suficiente para justificar a conversão. Para a conexão entre esses dois reservatórios, é possível utilizar túneis, de modo a preservar a vegetação local (SIL, 2017).

As usinas hidrelétricas reversíveis possuem menor porte que as Usinas Hidrelétricas convencionais. Para efeitos comparativos, a Tabela 1 apresenta uma relação entre a capacidade instalada e o volume útil do reservatório superior entre a UHR Shisanling na China e as UHEs de Três Irmãos e Ilha dos Pombos no Brasil.

Tabela 1 - Capacidades instaladas por volume útil do reservatório superior entre a UHR Shisanling e as UHEs Três Irmãos e Ilha dos Pombos

	Capacidade Instalada (MW)	Volume útil do reservatório superior (hm³)
UHR Shisanling	800	4
UHE Três Irmãos	808	3450
UHE Ilha dos Pombos	187	7

Fonte: PINHEIRO (2016)

Ao comparar a UHR Shisanling com a UHE Ilha dos Pombos, nota-se que para volume útil dos reservatórios superiores semelhantes, a capacidade instalada da usina hidrelétrica é bastante inferior. Já para a UHR Shisanling e a UHE Três irmãos, verifica-se que para atingir uma capacidade instalada semelhante, é necessário um volume útil do reservatório superior bastante elevado.

O que define a viabilidade de uma UHR é a relação entre o preço de venda da energia gerada pela turbina e o custo da energia utilizada para o bombeamento. Também é necessária a realização de estudos de viabilidade socioambiental e técnica e é importante a criação de um marco legal e regulatório para a potência gerada e para a devolvida ao sistema por meio do sistema de bombeamento (VARELLA, 2018).

Vale ressaltar que, em geral, as UHRs consomem mais energia que produzem, o que faz com que sejam contabilizadas como carga no sistema. Entretanto, as usinas reversíveis possuem a capacidade de gerar grandes valores de potência num curto intervalo de tempo, o que garante atendimento nos horários que o sistema elétrico mais demanda geração. Além disso, grandes alturas de queda de água são necessárias para a viabilidade técnica de uma UHR. Em geral, as UHRs possuem alturas de queda entre 30 e 760 m (PINHEIRO, 2016). O capítulo seguinte discutirá o incremento de geração no SIN com a utilização dessas usinas.

3 ANÁLISE DE DESPACHO DE GERAÇÃO

O propósito deste capítulo é modelar e analisar a variação de geração com a utilização de Usinas Hidrelétricas Reversíveis com bombas acionadas por meio da utilização de geração eólica, comparando cenários como a geração de energia eólica ligada diretamente no SIN, as turbinas-bombas acionadas somente quando a demanda do sistema é menor e a geração eólica acionando exclusivamente as turbinas-bombas. Após isso, será discutido a viabilidade de implementação do sistema proposto.

3.1 Definição do modelo proposto

Entre o final da década de 1970 e o da década de 1980 surgiram os primeiros estudos de pré-inventário de implementação de Usinas Hidrelétricas Reversíveis para as regiões Sudeste, Sul e Nordeste do Brasil. E, visando a atualização desses estudos e com uma precisão adequada que analise os locais mais viáveis para implantação de UHRs, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) publicou em 2019 a nota técnica “Estudos de Inventário de Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) ” que traz os resultados preliminares para o Rio de Janeiro considerando a inserção dessa nova tecnologia no estado.

De modo a mapear os locais promissores, a EPE desenvolveu uma ferramenta em plataforma ArcGIS denominada GeoUHR que permite integrar características socioambientais, linhas de transmissão e reservatórios existentes para priorizar as regiões mais favoráveis. Além disso, o trabalho apresentou as premissas no que tange ao pré-dimensionamento das usinas selecionadas pela plataforma utilizada. A modelagem numérica deste estudo considera os parâmetros de entrada de uma das Usinas Reversíveis sugeridas no documento.

Dentre os critérios de projeto adotados, cabe destacar que as características das UHRs decorrem da premissa de operação considerada de tempo de geração de 3 horas na potência máxima.

A equação para a potência de geração e energia elétrica armazenada é dada pela expressão (EPE, 2019):

$$P = \rho * g * Q * H * \eta_g * \eta_t \quad (4)$$

Onde:

P: Potência elétrica produzida nos bornes dos motores-geradores em [W];

ρ : Massa específica da água em [kg/m³];

g : Aceleração da gravidade local em [m/s²];

Q : Vazão turbinada total em [m³/s];

η_t : Rendimento da turbina-bomba no modo turbina, adotado como sendo um valor constante de 90%;

η_g : Rendimento do motor-gerador no modo gerador, adotado como sendo um valor constante igual a 98%.

A vazão da bomba e energia consumida são dados pela seguinte equação (EPE, 2019):

$$Q_b = \frac{P * \eta_b * \eta_m}{\rho * g * (H_b + \Delta h)} \quad (5)$$

Onde:

P : Potência elétrica consumida nos bornes dos motores-geradores em [W];

Q_b : Vazão bombeada em [m³/s];

η_b : Rendimento da turbina-bomba no modo bomba, adotado como sendo um valor constante igual a 92%;

Cabe destacar que os valores estimados não consideram as perdas associadas ao rendimento dos transformadores, consumo de equipamentos auxiliares, perdas volumétricas, por evaporação, infiltração e vazamento.

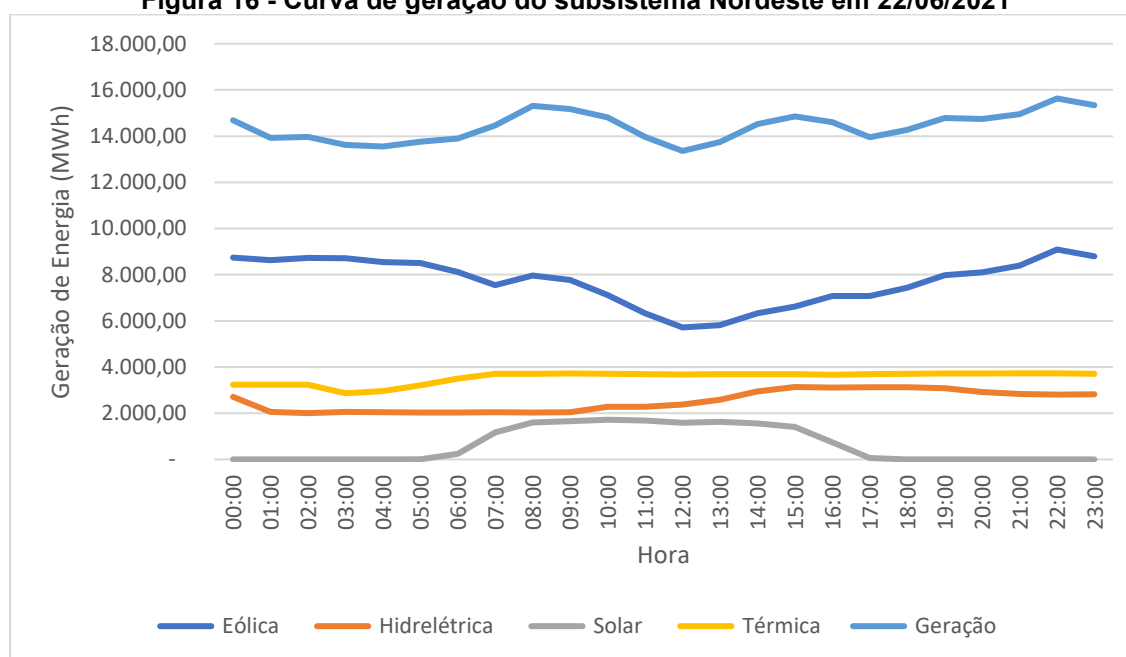
Além disso, considerou-se que a potência máxima consumida pelas unidades reversíveis no bombeamento é igual a potência máxima produzida pelas mesmas no modo geração. Em relação ao modo de operação, estabeleceu-se que todas as unidades reversíveis estão em funcionamento no bombeamento da água do reservatório inferior para o superior, o que gerou um tempo de bombeamento estimado de aproximadamente 4 horas para o completo enchimento do volume útil do reservatório da UHR hipotética. Os demais parâmetros de entrada do modelo numérico da Usina Reversível considerada e os valores calculados são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros de entrada da usina hipotética.

Potência instalada (Geração) [MW]	3258,50
Volume útil [hm ³]	10,59
Queda bruta média (H) [m]	410,0
Vazão total turbinada [m ³ /s]	980
Perda de Carga (geração, 100%) (m)	13,4
Reservatório Superior (N.A. máx.) [m.a.n.m]	1040,0
Reservatório Inferior (N.A. mín.) [m.a.n.m]	630,0
Quantidade de unidades reversíveis	12
Tempo de geração (horas)	3
Tempo de bombeamento (horas)	4

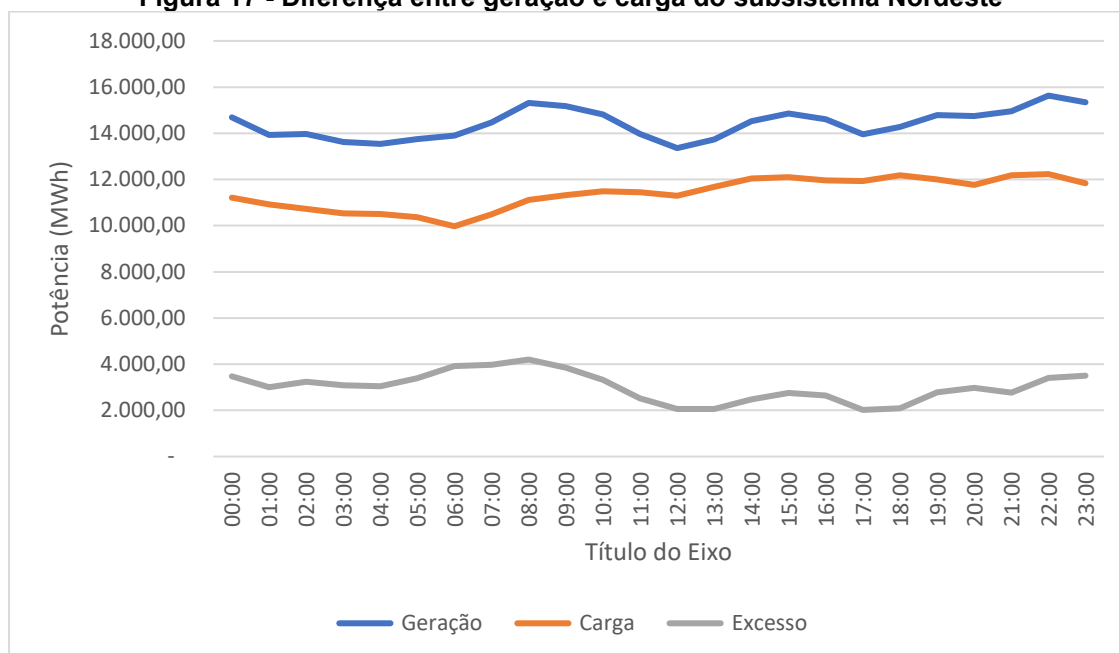
Fonte: EPE (2019)

A geração eólica é variável ao longo do dia, característica intrínseca dos ventos. Para o modelo numérico, a curva de geração eólica foi obtida por meio do histórico de geração eólica do subsistema Nordeste do SIN referente ao dia 22 de junho de 2021 e é apresentada na Figura 16 em conjunto das principais fontes de energia do subsistema.

Figura 16 - Curva de geração do subsistema Nordeste em 22/06/2021

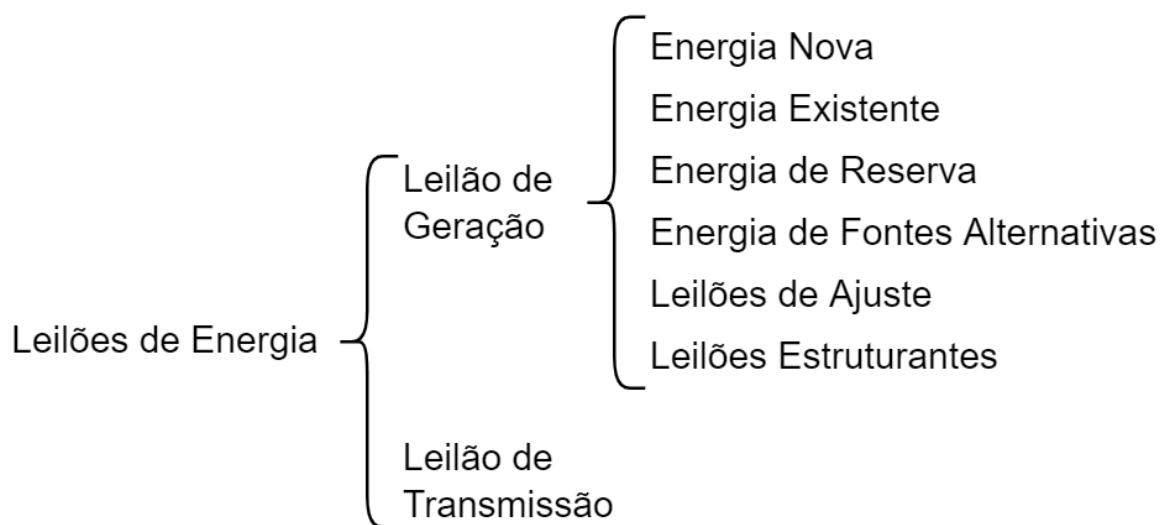
Fonte: Adaptado de ONS (2021)

Para estimar o excesso de geração, a fim de avaliar o acionamento das bombas das UHRs, elaborou-se uma curva da diferença entre a geração e carga do subsistema Nordeste em 22 de junho de 2021. Os dados são apresentados na Figura 17.

Figura 17 - Diferença entre geração e carga do subsistema Nordeste

Fonte: Adaptado de ONS (2021)

Regularmente, a ANEEL promove leilões para a contratação de energia elétrica de forma a garantir o abastecimento da população com o menor custo. Assim, a menor tarifa define os vencedores durante as negociações. E, para garantir a diversificação e modernização da matriz energética brasileira, a ANEEL realiza diversos tipos de leilões. Os tipos de leilões de energia podem ser observados na Figura 18.

Figura 18 - Tipos de leilões de energia

Fonte: Autoria própria (2022)

Segundo a ANEEL, o Leilão de Energia Nova busca atender o acréscimo de carga das distribuidoras por meio da construção de usinas novas. O Leilão de

Energia Existente serve para contratar energia gerada por usinas já construídas e que estejam em operação. O Leilão de Energia de Reserva tem o intuito de elevar a segurança do SIN, com a energia proveniente de usinas específicas. O Leilão de Fontes Alternativas tem o objetivo de aumentar a participação de fontes renováveis no ambiente regulado. O Leilão de Ajuste visa adequar a contratação de energia pelas distribuidoras, corrigindo possíveis desvios nas previsões feitas por elas em leilões anteriores. E por fim, o Leilão Estruturante destina-se à compra de energia de projetos de geração indicados por resolução do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), aprovados pelo Presidente da República e tem caráter estratégico e de interesse público.

Para a mensuração deste estudo, foram utilizados os preços do Leilão de Geração de Energia Nova A-5 008/2021. Além disso, em relação às Usinas Hidrelétricas Reversíveis, considerou-se as perdas relacionadas somente à diferença de tempo entre a geração e bombeamento das UHRs e os mesmos preços praticados para as UHEs para a geração. Quanto a precificação do bombeamento, não foi considerado neste estudo, visto que depende de uma análise aprofundada da precificação das UHRs no modelo regulatório brasileiro.

Os preços são apresentados no Quadro 4 e serão discutidos os resultados obtidos pelos cenários propostos no capítulo seguinte.

Quadro 4 – Preços por fonte

Fonte	R\$/MWh
Eólica	191,00
Hidrelétrica	174,27
Térmica	270,75
Reversíveis	174,27

Fonte: Adaptado de CCEE (2021)

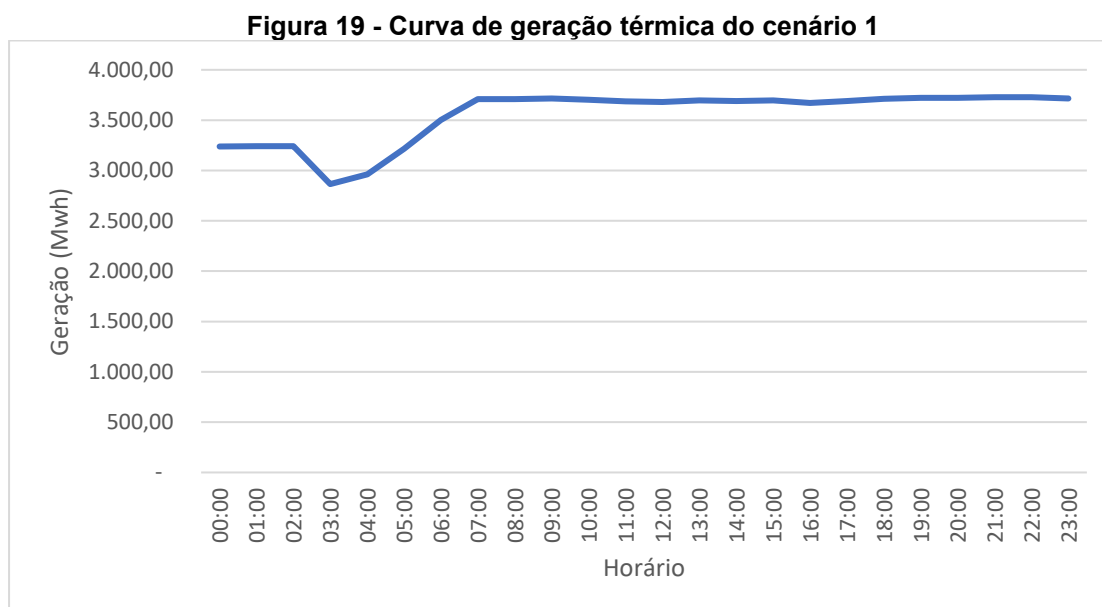
4 RESULTADOS OBTIDOS

O estudo baseou-se nos dados do subsistema Nordeste, visto que a maior concentração dos parques eólicos no Brasil encontra-se nesta região, e foi dividido em três cenários. O primeiro cenário é a condição base, sem a inserção de Usinas Reversíveis. A segunda hipótese contempla a inserção das UHRs, porém com a operação das UHRs somente quando há excedente de potência no sistema capaz de operar as bombas até o completo enchimento dos reservatórios pelas próximas quatro horas. Por fim, o terceiro cenário considera a operação constante das UHRs ao longo do dia, ou seja, ao fim do modo bombeamento, a UHR entra no modo geração.

O intuito desta análise é verificar o impacto no Sistema Interligado Nacional com a inserção das Usinas Hidrelétricas Reversíveis e a possível melhora do despacho hidrotérmico do Sistema Interligado Nacional.

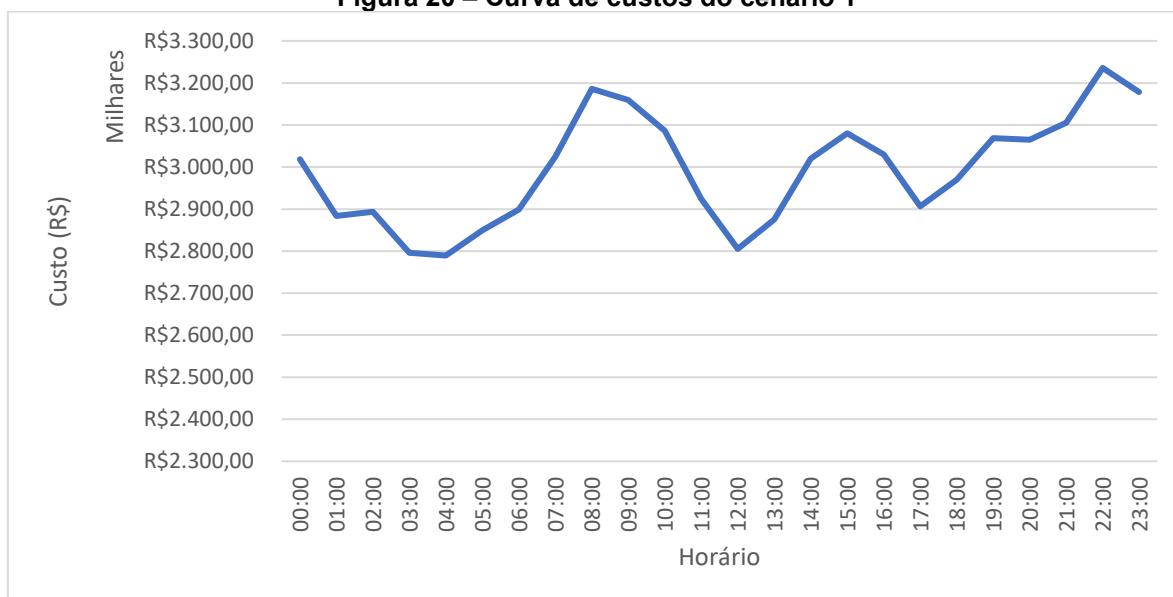
4.1 Cenário 1

Neste cenário, considerou-se a condição do sistema no dia avaliado, conforme Figura 16, sem a utilização da Usina Hidrelétrica Reversível. Assim, a curva de geração térmica base é apresentada Figura 19.



Fonte: Autoria própria (2022)

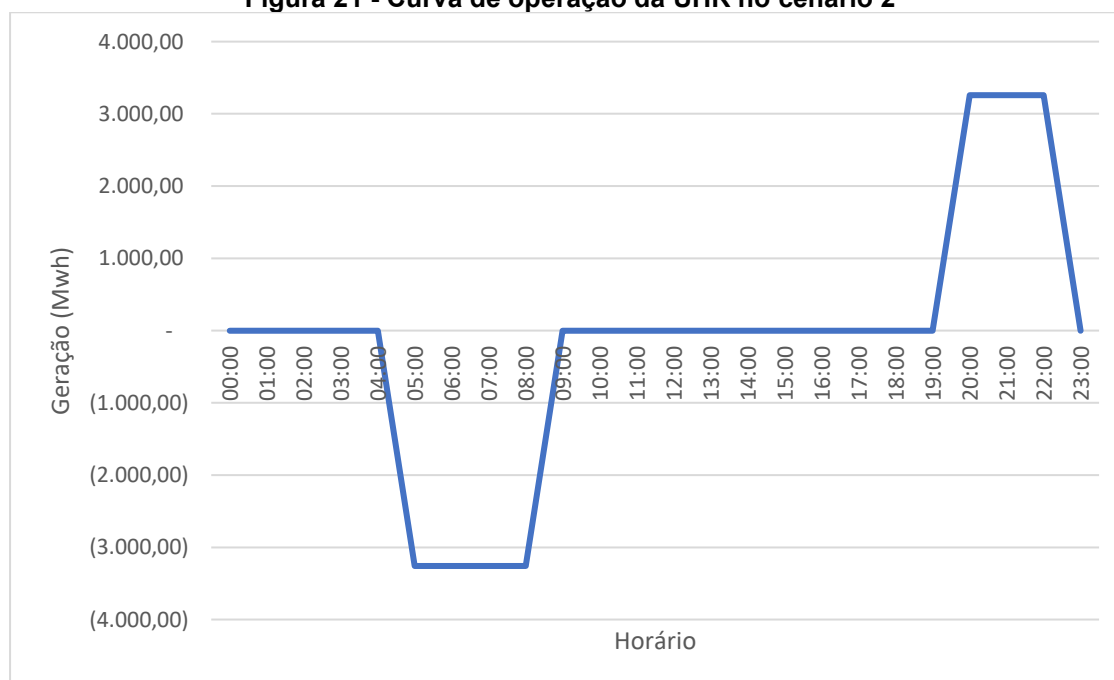
Com os preços estimados por fonte apresentados no Quadro 4, a curva de custos do cenário 1 é apresentada na Figura 20.

Figura 20 – Curva de custos do cenário 1

Fonte: Autoria própria (2022)

4.2 Cenário 2

Na segunda hipótese, considerou-se as bombas sendo alimentadas somente quando o excesso de geração do sistema ultrapassava a potência total de todas as unidades geradoras da UHR de 3.258,50 MWh pelo período de quatro horas. A Figura 21 aponta a curva de operação da UHR no Cenário 2.

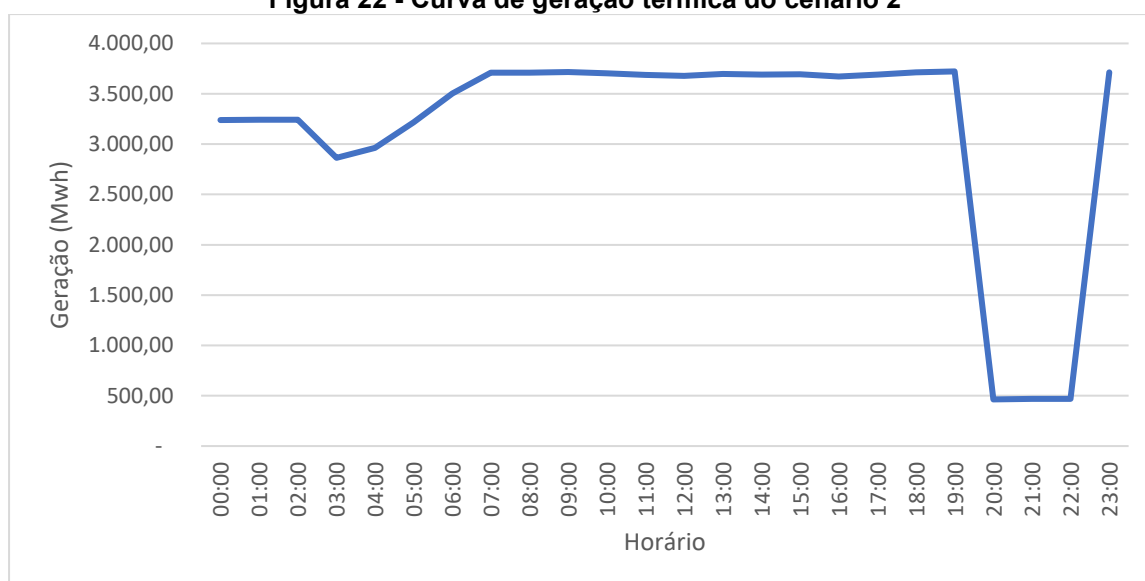
Figura 21 - Curva de operação da UHR no cenário 2

Fonte: Autoria própria (2022)

O período de bombeamento ocorreu entre os horários de 05:00 e 09:00, que foram os momentos registrados de menor carga no sistema e maior excesso de geração. O período de geração da UHR ocorreu entre 20:00 e 22:00, horários que registraram o maior percentual de geração térmica durante o dia.

Com o acréscimo de potência fornecido pela UHR para este cenário, obteve-se na simulação uma diminuição da geração térmica. A curva de geração térmica do cenário 2 é apresentada Figura 22.

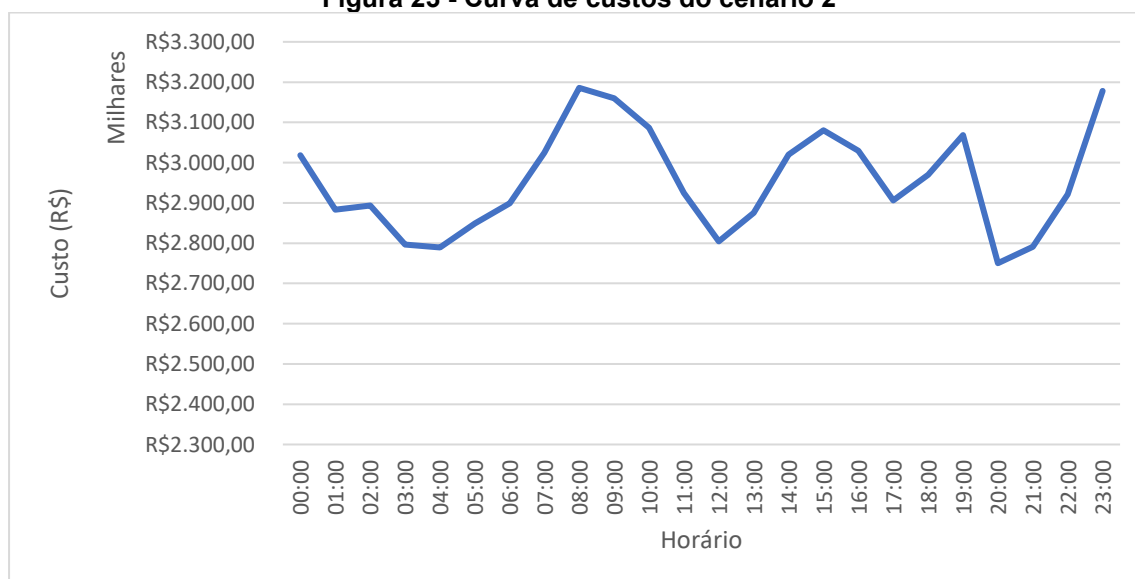
Figura 22 - Curva de geração térmica do cenário 2



Fonte: Autoria própria (2022)

Assim, com base nos gráficos da Figura 21 e Figura 22, foi gerada a curva de custos do Cenário 2, representada na Figura 23.

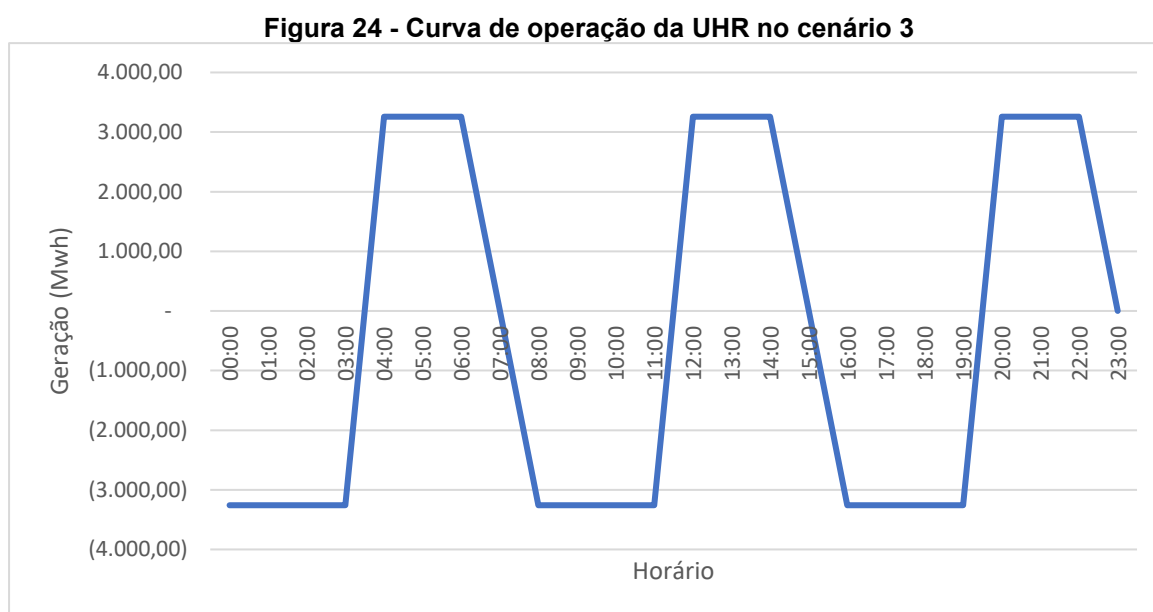
Figura 23 - Curva de custos do cenário 2



Fonte: Autoria própria (2022)

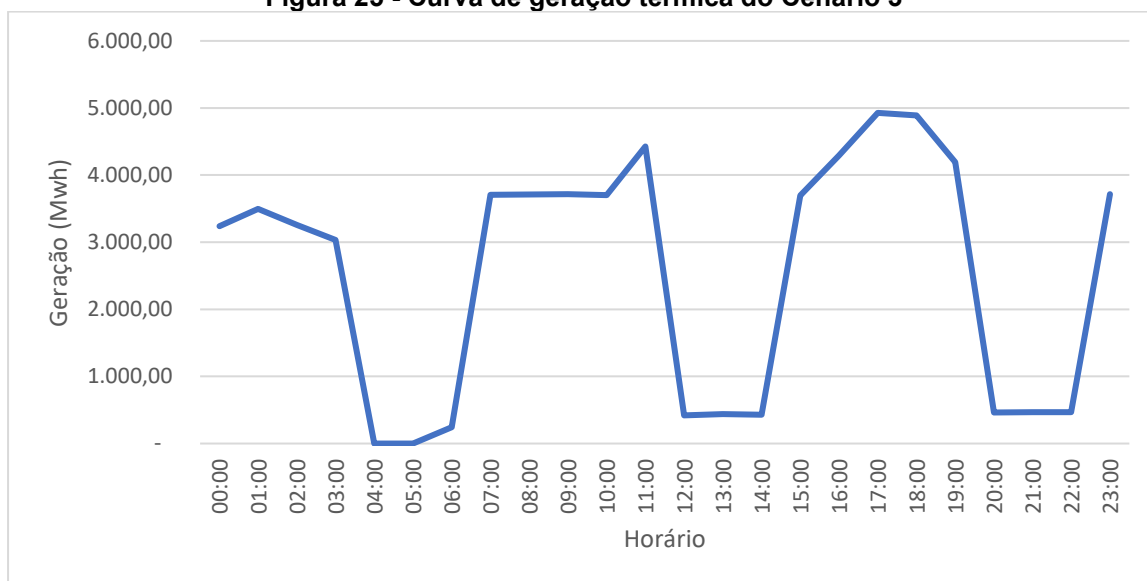
4.3 Cenário 3

No terceiro cenário, a UHR opera durante todo o dia, alternando o modo de operação assim que um deles é finalizado. Nesse estado, considerou-se o intervalo de uma hora para a alternância de condição operacional. Como este estudo considera grade horária, o período de comutação é considerado somente ao final do ciclo completo de bombeamento e geração. Assim, a UHR funciona no modo bombeamento durante doze horas, nove horas em geração e três horas para a comutação dos modos operativos. A curva de operação da UHR no Cenário 3 é apresentada na Figura 24.



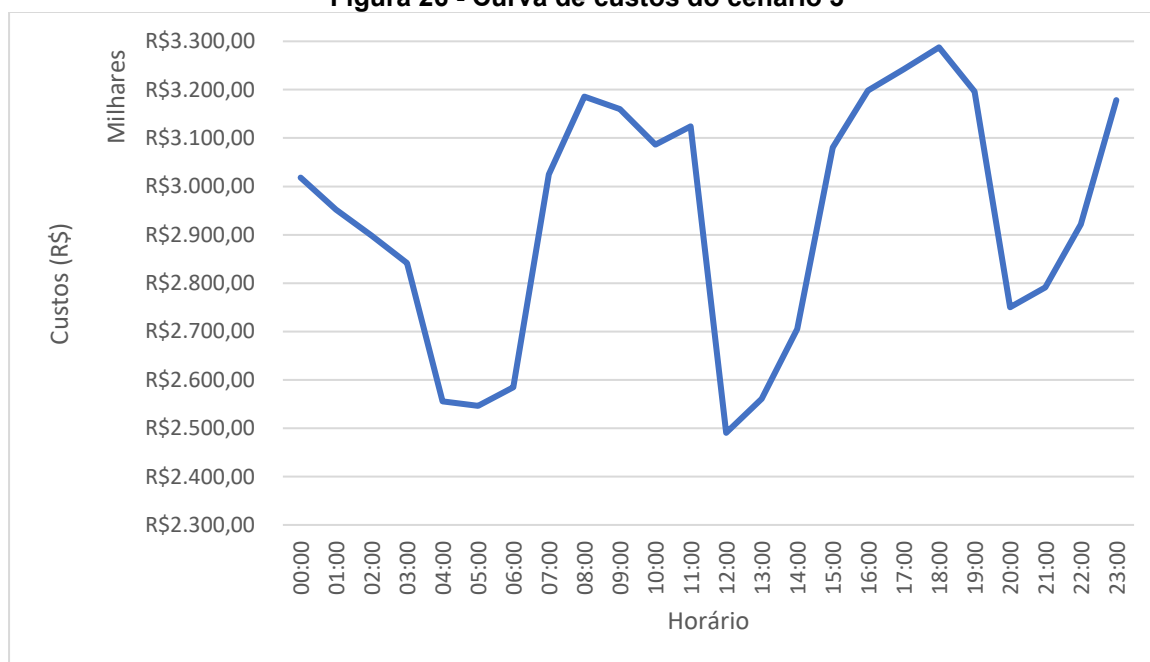
Fonte: Autoria própria (2022)

Uma vez ocorrido o tempo de bombeamento de quatro horas, a UHR entrará no modo geração pelas próximas três horas. Assim, para os momentos que as bombas necessitaram de mais potência do que havia disponível, adicionou-se geração proveniente de Usinas Termelétricas. A curva de geração térmica para o Cenário 3 é apresentada na Figura 25.

Figura 25 - Curva de geração térmica do Cenário 3

Fonte: Autoria própria (2022)

Do mesmo modo, considerando a geração das Usinas Reversíveis e nova curva de geração térmica, foi gerada a curva de custos para o cenário 3.

Figura 26 - Curva de custos do cenário 3

Fonte: Autoria própria (2022)

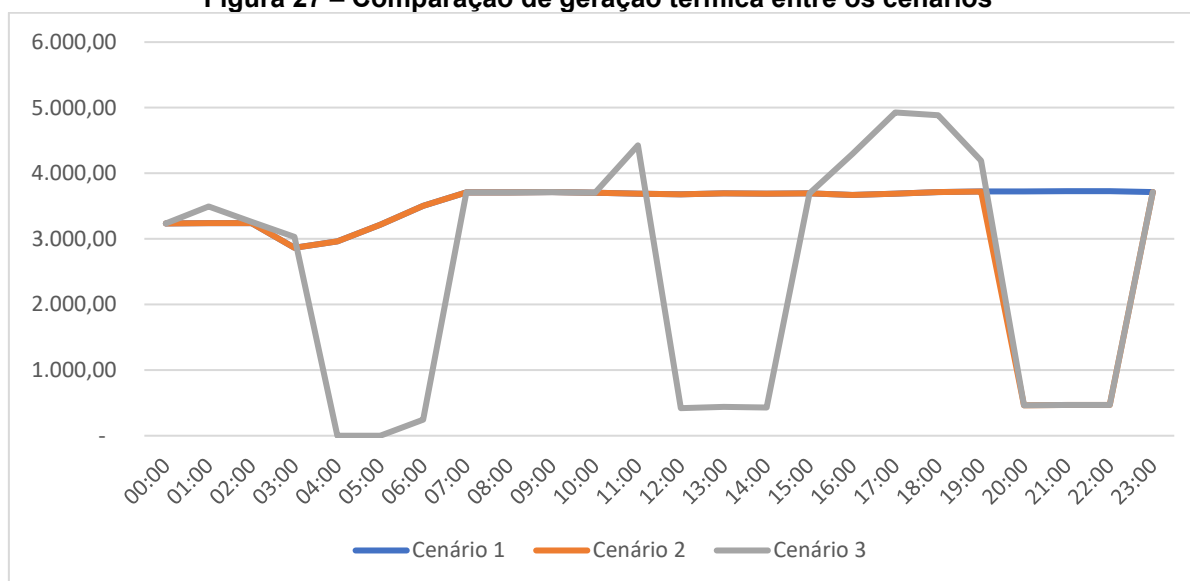
Neste cenário, nota-se que ao longo do dia, não há potência disponível para a alimentação das bombas, o que gera a necessidade de incremento da geração por meio das termelétricas. O período que houve a maior necessidade de incremento de geração ocorreu entre 16:00 e 19:00. O comparativo entre os três cenários poderá ser observado na seção seguinte.

4.4 Análise de resultados

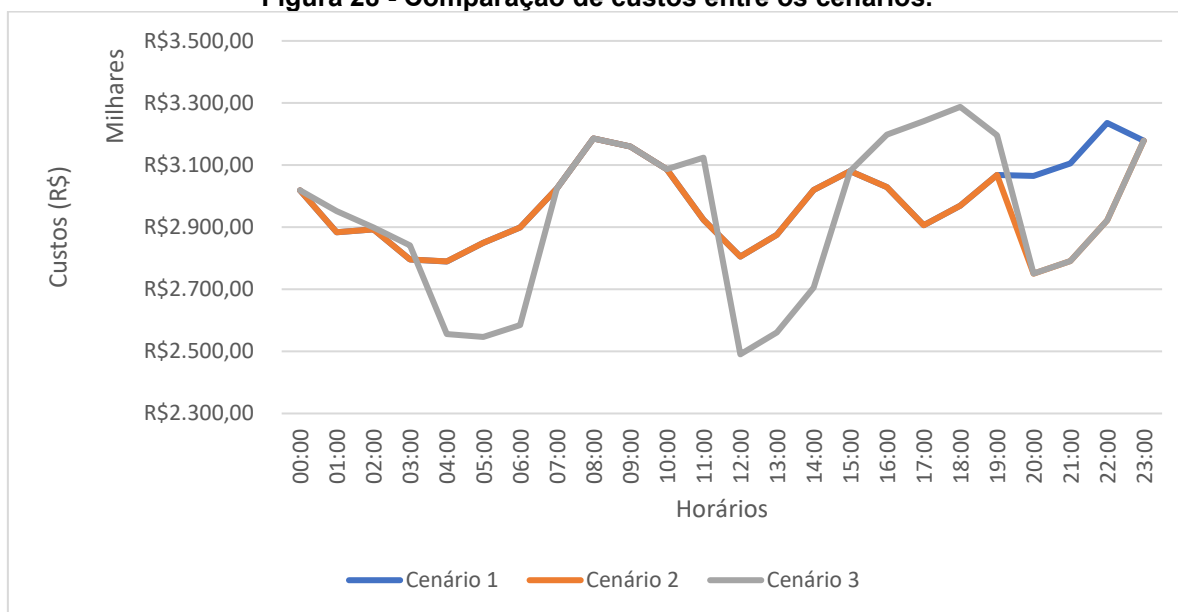
Apesar da necessidade de diversificação da matriz energética brasileira, a introdução de novas fontes de energia no Sistema Interligado Nacional é desafiadora. A utilização de Usinas Hidrelétricas Reversíveis associadas a fontes intermitentes no Brasil é bastante complexa, visto que são diferentes dos modelos de geração praticados atualmente no país. Além das dificuldades ambientais, visto que as UHRs necessitam de dois reservatórios, no Brasil não há um modelo regulatório definido para essa fonte.

No desenvolvimento deste estudo, buscou-se criar um critério que fosse possível a comparação das fontes de energia já presentes no país com a introdução das UHRs. A Figura 27 e Figura 28 apresentam em um único gráfico a comparação da geração térmica e dos custos entre os cenários propostos, respectivamente.

Figura 27 – Comparação de geração térmica entre os cenários



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 28 - Comparação de custos entre os cenários.

Fonte: Autoria própria (2022)

No modelo sugerido, a viabilidade da utilização de UHRs conciliada com a energia proveniente dos parques eólicos dá-se pela diminuição da contratação da potência proveniente de usinas termelétricas, que possuem um custo mais elevado se comparada a geração eólica e hidrelétrica.

Como pode ser observado com os dados apresentados, há uma diminuição considerável dos custos quando há a geração das Usinas Hidrelétricas Reversíveis. Contudo, nota-se que devido a característica intermitente dos parques eólicos, nos momentos de bombeamento da água do reservatório inferior para o superior, há a possibilidade de necessitar de mais energia disponível para que ocorra completamente o enchimento dos reservatórios.

Além do mais, nota-se a melhora do despacho hidrotérmico, visto que é possível operar a UHR no modo geração em momentos que sejam mais interessantes para o SIN, como é demonstrado no Cenário 2. No entanto, a operação constante das Usinas Reversíveis pode não ser favorável, pois em períodos em que o sistema necessita de mais potência, as bombas podem elevar o problema, como ocorre no Cenário 3.

Ainda, existem algumas limitações do modelo proposto que devem ser levadas em consideração. A primeira delas é a de que o sistema não considerou as perdas, sendo a potência consumida no bombeamento igual a potência concebida na geração. Devido a não existir modelo regulatório para as UHRs no Brasil, outra

limitação seria referente a estimativa dos custos dessa matriz, onde os preços são definidos com base nos riscos relacionados à imprevisibilidade da receita futura para o empreendedor. Neste estudo, considerou-se que o custo de geração das UHRs é igual a das UHEs. Além disso, não foram consideradas as limitações referentes a variação de potência gerada pelas termelétricas com base nas características operativas das Usinas Reversíveis

De qualquer forma, a introdução de Usinas Reversíveis no SIN é positiva, uma vez que com o crescimento das fontes intermitentes no sistema, aumentar a controlabilidade da capacidade de geração para o atendimento das cargas torna-se bastante interessante.

5 CONCLUSÕES

Dado o exposto, nota-se que as Usinas Hidrelétricas Reversíveis podem ser bastante benéficas para a diversificação da matriz energética brasileira. Os sistemas elétricos requerem constante equilíbrio entre o que é consumido e o que é gerado, a fim de manter a frequência da rede dentro dos limites necessários para o seu correto funcionamento.

Em adição a capacidade de geração, as UHRs podem atuar na garantia de operacionalidade do SIN, atuando nos controles primários e secundários das unidades geradoras, suporte de reativos, despacho complementar para manutenção da reserva de potência operativa, autorrestabelecimento parcial e integral e sistemas especiais de proteção.

Além disso, conforme exposto, as UHRs podem auxiliar na melhora do despacho hidrotérmico do Sistema Interligado Nacional. O modelo proposto neste estudo sugere uma forma de conciliar fonte eólica com usinas reversíveis para o atendimento de uma demanda variável. Cabe destacar a capacidade do sistema em auxiliar o atendimento das cargas em momentos de picos, mesmo com a utilização de fontes intermitentes.

Contudo, vale ressaltar também alguns dos desafios para a inserção dessa fonte energética no país, como licenciamento ambiental, tempo de provisionamento, valoração de benefícios, imprevisibilidade de receita e enquadramento regulatório. No geral, os desafios de implantação das UHRs são similares aos de hidrelétricas convencionais em relação às questões técnicas e ambientais. Sugestivamente, a transformação de Usinas Hidrelétricas Convencionais em Usinas Reversíveis com a construção de um reservatório inferior poderia facilitar a inserção desse modelo no Brasil.

Em novos estudos, recomenda-se detalhar as perdas associadas ao sistema, como as perdas relativas aos rendimentos dos transformadores, consumo de equipamentos auxiliares, evaporação, infiltração e vazamentos. Além disso, seria interessante propor a coordenação da geração e bombeamento de mais de uma Usina Reversível de modo a possibilitar a desativação por completo de determinadas Usinas Termelétricas. Sugere-se também o detalhamento da transformação de UHEs em UHRs e suas dificuldades.

REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. **Boletim Anual de Geração Eólica 2019**. ABEEólica, 2020. Disponível em: https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/04/PT_Boletim-Anual-de-Geracao-2019-1.pdf. Acesso em: 12 jun. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos**. ANA, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/centrais-de-conteudos/publicacoes/conjuntura-dos-recursos-hidricos>. Acesso em: 12 jun. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. ANEEL, 2008. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>. Acesso em: 01 maio 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Energia Eólica**. ANEEL, 2003. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf). ANEEL. Brasília - DF, 2003. Acesso em: 29 ago. 2021.
- BUENO, A. F. M.; BRANDÃO, C. A. L. **Visão Geral de Tecnologia e Mercado para os Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica no Brasil**. ABAQUE, 2016. Disponível em: http://abaque.com.br/wp-content/uploads/2017/07/Estudo_Mercado_Armazenamento_Brasil.pdf. Acesso em: 29 ago. 2021.
- CANALES, F. A.; BELUCO, A.; MENDES, C. A. B. **Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas**. Porto Alegre - RS. UFRS, 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/index.php/reget/article/view/16002>. Acesso em: 29 ago. 2021.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5ª Edição. Editora Bookman AMGH LTDA, 2013.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR): Desafios para inserção em mercados de energia elétrica**. EPE, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-561/EPE-DEE-NT-013_2021-r0.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Estudos de Inventário de Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR): Metodologia e resultados preliminares para o Estado do Rio de Janeiro**. EPE, 2019. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-353/EPE-DEE-NT-006_2019-r0.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- ENEL GREEN POWER. **Energias Renováveis**. ENEL, 200-?. Disponível em: <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/energia-hidraulica>. Acesso em: 04 out. 2021.

GALVÃO, J.; BERMANN, C. **Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas**. USP, 2015. Disponível em:

<https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/104941>. Acesso em: 04 out. 2021.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report 2019**. GWEC, 2020.

Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2019/>. Acesso em: 29 ago. 2021.

GOMES, E. P. **Potencial de repotenciação de usinas hidrelétricas no Brasil e sua viabilização**. 112 p. Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP, Campinas – SP, 2013. Disponível em:

https://meioambiente.mppr.mp.br/arquivos/File/Acervo/Potencial_repotenciacao_UHE_viabilizacao.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.

HENN, É. L. **Máquinas de Fluido**. 2ª Edição. Editora UFSM, 2012.

INFOESCOLA. **Como funciona uma Hidrelétrica**. INFOESCOLA, 200-?.

Disponível em: <http://www.infoescola.com/fisica/como-funciona-uma-hidreletrica/>. Acesso em: 15 out. 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook**. Paris: IEA, 2015.

ITAIPU. **ENERGIA**. ITAIPU, 2020. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/capa-energia>. Acesso em: 15 out. de 2021.

LIMA, E. C; SANTOS, I. A.; MOIZINHO, L. C. S. **Energia Eólica no Brasil: Oportunidades e Limitações para o Desenvolvimento Sustentável**.

UNIVATES, 2018. Disponível em:

<http://univates.br/revistas/index.php/estudoedebate/article/view/1641>. Acesso em: 15 out. 2021.

LOPES, R. E.; MARTINEZ, C. B. **O uso de bombas funcionando como turbinas para sistemas de recalque de água**. UFPB, 2006.

MARENGO, J. A. *et al.* **A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo**.

USP, 2015. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/110101>. Acesso em: 29 ago. 2021.

MARINHO, M. H. N.; Aquino, R. R. B. **Complementariedade Sazonal Hidro-Eólica para Oferta de Energia Elétrica**. UFPE, 2007. Disponível em:

[https://abrh.s3.sa-east-](https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/19/6da324dbefdcff19ecb5832c00e06816_5bad7478672f0f7f3d8c7ddb73bcdd74.pdf)

[1.amazonaws.com/Sumarios/19/6da324dbefdcff19ecb5832c00e06816_5bad7478672f0f7f3d8c7ddb73bcdd74.pdf](https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/19/6da324dbefdcff19ecb5832c00e06816_5bad7478672f0f7f3d8c7ddb73bcdd74.pdf). Acesso em: 26 abr. 2021.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E.B. **O aproveitamento da energia eólica**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, 2007. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbef/a/nL6x7dJv9gJv7HnkTSJRLfS/abstract/?lang=pt>.

Acesso em: 05 nov. 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Brasil é o país com melhor fator de aproveitamento da energia eólica**. MME, 2015. Disponível em:

<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-e-o-pais-com-melhor-fator-de-aproveitamento-da-energia-eolica>. Acesso em: 12 jun. 2021.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **O Sistema Interligado Nacional**. ONS, 2019. Disponível em: <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 01 maio 2021.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Capacidade Instalada de Geração**. ONS, 2022. Disponível em: http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/capacidade_instalada.aspx. Acesso em: 08 jun. 2022.

PINHEIRO, V. C. **Contribuição aos estudos regulatórios para inserção de sistemas de geração de energia elétrica compostos por fontes hidráulicas reversíveis, solares e eólicas no Brasil**. Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, Campinas – SP, 2016.

PEREIRA, M. G. **Projeto de usinas Hidrelétricas: Passo a Passo**. 1ª edição. Editora Oficina de Textos, 2015.

QUEIROZ, R. *et al.* **Geração de energia elétrica através da energia hidráulica e seus impactos ambientais**. UFSM, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/index.php/reget/article/view/9124/0>. Acesso em: 01 maio 2021.

RUNCOS, F. *et al.* **Geração de Energia Eólica – Tecnologias Atuais e Futuras**. WEG Máquinas, 200-?. Disponível em: <https://sinueloagropecuaria.com.br/wp-content/uploads/2016/09/energia-eolica.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2021.

SCHREIBER, G. P. **Usinas hidrelétricas**. Editora Edgard Blucher, 1978.

SIL, A. C. **As usinas reversíveis estão chegando**. UFRJ, 2017. Disponível em: <http://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/IFES/BV/sil2.pdf>. Acesso em: 03 de jan. de 2021.

TECNOGERA. **Quais as diferenças entre um gerador síncrono e assíncrono?** TECNOGERA, 2016. Disponível em: <https://blog.tecnogera.com.br/blog/quais-as-diferencas-entre-um-gerador-sincrono-e-assincrono>. Acesso em: 29 ago. de 2021.

LEÃO, F. **Capítulo 5: Eletrotécnica**. UNESP, 2016. Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/slides-2016-cap5_eletrotecnica_fabioleao.pdf. Acesso em: 30 ago. 2021.

VARELLA, L. N. **Usinas Hidrelétricas Reversíveis: perspectivas para o setor elétrico brasileiro**. UFRJ, 2018. Disponível em: http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/05_varella_abril.pdf. Acesso em: 26 abr. 2021.