

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – IEM**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA DE ENERGIA**

Luiza Fortes Miranda

**ESTUDO DE TURBINA HIDROCINÉTICA PARA OPERAÇÃO EM**  
**REGIME DE MARÉS EM ESTUÁRIOS**

Itajubá  
Março de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI  
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – IEM  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA

Luiza Fortes Miranda

ESTUDO DE TURBINA HIDROKINÉTICA PARA OPERAÇÃO EM  
REGIME DE MARÉS EM ESTUÁRIOS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia pela Universidade Federal de Itajubá.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho

Coorientador: Prof. Dr. Ramiro Gustavo Ramirez Camacho

Itajubá  
Março de 2021

Dedico este trabalho aos meus pais, Lucia Helena e Luiz Celio, à minha irmã Luana e aos bons amigos que conquistei até aqui. Eles fazem tudo ter sentido.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor Dr. Geraldo Lucio Tiago Filho, pela paciência, pela orientação sem a qual este trabalho seria impossível e pelo entusiasmo cotidiano inspirador com o qual ele promove ensino, pesquisa e extensão na Universidade. Agradeço com igual reconhecimento ao professor Dr. Ramiro Gustavo Ramirez Camacho, coorientador deste trabalho, sempre dedicado a novas ideias e disposto a compartilhar conhecimento.

A todos os professores e servidores da Universidade Federal de Itajubá, que mantêm a universidade pública viva.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida por meio do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia denominado Instituto Nacional de Energias Oceânicas e Fluviais - INEOF.

Agradeço por fim, a todos os colegas do CERPCH e da Unifei, pelo convívio diário e apoio sem os quais o trabalho seria mais que extenuante.

*“Não sejas sábio a teus próprios olhos”  
(Provérbios 3:7)*

*“Enquanto estiver o poder sozinho de um lado, e as luzes e a sabedoria de outro, os sábios raramente pensarão grandes coisas, os príncipes raramente dirão coisas belas e os povos continuarão a ser vis, corrompidos e infelizes.”*

*Jean-Jacques Rousseau no Discurso sobre as ciências e as artes (1750)*

## RESUMO

A busca por geração sustentável de eletricidade cresce com o aumento da demanda concomitante à consciência da influência humana nas mudanças climáticas. Esse é um marco da transição energética, que objetiva redução dos impactos ambientais e do uso de combustíveis fósseis, mantendo a segurança energética. A eletricidade é uma forma de energia relativamente fácil de ser transportada e transformada, mas que ainda é de difícil acesso por parte da população. Nesse contexto, interessa o desenvolvimento de turbinas hidrocinéticas, que transformam a energia cinética de um escoamento fluvial ou oceânico em potência de eixo e acionam um gerador. Em contraste com turbinas hidráulicas convencionais, essas turbinas não exigem barragens, operam fluxo livre. No trabalho propõe-se, primeiramente, uma classificação em níveis de maturidade tecnológica com definições adaptadas a turbinas hidrocinéticas – esse tipo de classificação tem o objetivo de validação técnica pragmática e redução de custos em projetos de pesquisa de engenharia. A segunda proposta do trabalho é o estudo de caso, em que é feita a modelagem numérica de uma turbina hidrocinética, inicialmente projetada para aplicação fluvial unidirecional, operando em regime de marés com escoamento em dois sentidos intermitentes. Para as simulações foi utilizado o software comercial de fluidodinâmica computacional ANSYS CFX® na solução numérica de grandezas locais e globais para análise da influência do projeto da pá no rendimento da máquina. As turbinas hidrocinéticas podem ser aplicadas a pequenos sistemas para eletrificação de vilarejos, sendo o custo o principal limitante desses projetos; ou a grandes sistemas, geralmente compostos por parques com diversos rotores, cuja viabilidade depende fortemente do rendimento da turbina. Manter a matriz elétrica brasileira predominantemente renovável é um desafio de interesse estratégico para sua sustentabilidade e que gera oportunidades para o fomento do mercado de turbinas hidrocinéticas. Mundialmente essa ainda não é uma tecnologia consolidada, possibilitando o desenvolvimento tecnológico nacional de novos modelos de turbina.

**Palavras-chave:** geração sustentável, turbinas hidrocinéticas, níveis de maturidade tecnológica, fluidodinâmica computacional.

## ABSTRACT

An increase in the demand for sustainable electricity generation can be seen as the knowledge about the human influence on global warming expands associated with an increase in the world electricity demand. This characterizes the energy transition, seeking to reduce both environmental impacts and fossil fuels use, while keeping the energy security. It is relatively easy to transport and transform the electrical form of energy, but there is still a lack of access to electricity in many regions around the world. In this context, the development of hydrokinetic turbines can be valuable. This type of turbine transforms the kinetic energy of a river or ocean water flow into shaft power, that starts a generator. In contrast to conventional hydraulic turbomachines, these turbines do not require dams, as they are free flow turbines.

To define strategies for the study of hydrokinetic turbines, the steps for classification in Technology Readiness Levels are proposed. This management tool is often used with the aim of technical validation and cost reduction in engineering projects. One study case was also carried out. Numerical modeling was conducted to study a hydrokinetic turbine operating in tidal regime, with flow in two opposite orientations intermittently. The ANSYS CFX® software was used to numerically solve local and global quantities that were used to analyze the blade project influence on the machine efficiency with a computational fluid dynamics approach.

Hydrokinetic turbines can be used in small systems for electrification of villages or in farms with many turbines to achieve a higher installed power. In the first example, costs are limiting in the projects, while for large systems the efficiency usually defines the viability. The challenges for sustainable electricity generation increase the opportunities for development of new hydrokinetic turbines market. That can be beneficial to Brazil, the country already has a large participation of renewable sources for electricity generation but has challenges to keep this attribute. Hydrokinetic turbines are not a completely consolidated technology, therefore there is an opportunity for the development of new turbine models.

**Keywords:** Sustainable electricity generation, hydrokinetic turbines, Technology Readiness Levels, computational fluid dynamics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Fluxograma representando a metodologia geral do trabalho.....	4
Figura 2.1: Desenvolvimento da matriz energética mundial de 1990 a 2018.....	8
Figura 2.2: Participação por fonte na matriz energética mundial em 2018 .....	8
Figura 2.3: Desenvolvimento da matriz energética brasileira de 1990 a 2018 .....	9
Figura 2.4: Participação por fonte na matriz energética brasileira em 2018.....	9
Figura 2.5: Desenvolvimento da matriz elétrica mundial de 1990 a 2018.....	11
Figura 2.6: Participação por fonte na matriz elétrica mundial de 2018 .....	11
Figura 2.7: Desenvolvimento da matriz elétrica brasileira de 1990 a 2018.....	12
Figura 2.8: Participação por fonte na matriz elétrica brasileira de 2018 .....	12
Figura 2.9: Comparação entre participações de fontes renováveis e não renováveis nas matrizes energética e elétrica no Brasil e no mundo para o ano de 2018.....	13
Figura 2.10: Mapa do sistema de transmissão do SIN, horizonte 2024.....	15
Figura 2.11: Distribuição do potencial hidrelétrico brasileiro por região .....	17
Figura 2.12: Distribuição socioambiental do potencial hidrelétrico inventariado para UHE's no território brasileiro, dados referentes a 2017 .....	18
Figura 2.13: Gráficos de universalização do acesso à eletricidade. (a) dados do censo demográfico de 2000, escala de 74% a 100%. (b) dados do censo de 2010, com a mesma escala (c) dados do censo de 2010 com escala de 92% a 100% para melhor detalhamento.....	20
Figura 2.14: Gráficos de (a) Emissões mundiais de CO <sub>2</sub> pela atividade humana por ano de 1751 a 2017 e (b) concentração de CO <sub>2</sub> na atmosfera por ano.....	23
Figura 2.15: Energia gerada em geração distribuída por ano de 2015 a 2019.....	33
Figura 2.16: Potência instalada em geração distribuída no Brasil por ano de 2015 a junho de 2020. (a) todas as fontes consideradas (b) detalhamento excluindo a fonte solar com ajuste de escala.....	34
Figura 2.17: Relação entre energia gerada e energia relativa à potência instalada.....	35
Figura 2.18: Classificação de máquinas com foco em turbinas hidrocínéticas.....	37
Figura 2.19: Principais tipos de turbinas hidrocínéticas .....	38
Figura 2.20: Exemplo de turbina hidrocínética de eixo horizontal com difusor (a) desenho em corte longitudinal (b) modelo 3D .....	39
Figura 2.21: Tipo e direção da transformação de energia em turbinas hidrocínéticas....	39



Figura 2.22: Hidrofólio de turbina hidrocínética com representação das velocidades, ângulos e forças .....	40
Figura 2.23: Forças e velocidades numa turbina Savonius .....	41
Figura 2.24: Exemplo de curvas de coeficiente de potência, $C_p$ , por razão de velocidade de ponta da pá, $\lambda$ , de uma turbina de eixo horizontal e três pás, com variação do ângulo de passo, $\theta$ , da pá.....	43
Figura 2.25: Coeficiente de potência por razão de velocidade da ponta da pá para diversos tipos de rotores de turbinas de fluxo livre .....	44
Figura 2.26: Turbinas hidrocínéticas desenvolvidas na UNB: (a) turbina para aplicação na região central do Brasil, (b) novo modelo, para aplicação em região amazônica, com difusor e (c) terceira geração de turbinas desenvolvidas na UNB .....	45
Figura 2.27: Identificação das regiões com potencial hidrocínético superior a $0,5 \text{ kW/m}^3$ no mundo. ....	46
Figura 2.28: Distribuição de projetos de turbinas hidrocínéticas por país no mundo em 2015 .....	49
Figura 2.29: Distribuição de projetos de turbinas hidrocínéticas de correntes de marés por país em 2020.....	49
Figura 2.30: Exemplos de turbinas hidrocínéticas ensaiadas pelo EMEC (a) OpenHydro, modelo de turbina projetada para fornecer 2 MW de potência; (b) Modelo com conjunto de dois rotores em dispositivo flutuante, potência 2MW e (c) turbina Voith Hydro, 1MW, em transporte para o local de aplicação dos testes em campo.....	50
Figura 3.1: Níveis TRL definidos pela NASA.....	54
Figura 3.2: Níveis TRL adaptados para turbinas hidrocínéticas, distribuição em cinco etapas do desenvolvimento tecnológico .....	59
Figura 3.3: Formatos de células de malha utilizados em modelagens de CFD para estudos tridimensionais .....	64
Figura 4.1: Fluxograma de desenvolvimento do rotor estudado contendo os projetos anteriores e o estudo atual .....	66
Figura 4.2: Rotores projetados anteriormente: (a) rotor de pás planas, sem ogiva; (b) rotor com pás curvo-torcionadas, com ogiva .....	67
Figura 4.3: Triângulos de velocidade para entrada e saída da turbomáquina estudada (axial, sem sistema diretor). Para (a) escoamento no sentido de projeto e (b) escoamento no sentido oposto.....	70

Figura 4.4: Impacto de possíveis alterações em características do produto final no decorrer de um projeto .....	72
Figura 4.5: Malha do domínio estático: (a) visão geral com corte no plano XZ; (b) detalhe do refino da malha nas faces de contato com o domínio rotativo .....	74
Figura 4.6: Malha do domínio rotativo: (a) visão geral com corte no plano XZ; (b) detalhe do refino da malha nas paredes do rotor, com uso do ‘inflation’ .....	75
Figura 4.7: Relação $C_p$ por $\lambda$ obtida por Bolaños (2015) com adição da curva para o rotor de pá curvo-torcionada obtida no presente estudo na mesma faixa de velocidades .....	77
Figura 4.8: Curvas de potência de eixo por rotação para velocidades constantes de escoamento no sentido de projeto original .....	78
Figura 4.9 Curvas de potência de eixo por rotação para velocidades constantes de escoamento no sentido oposto ao do projeto original.....	79
Figura 4.10: Curvas de potência de eixo por rotação para 2 m/s nos dois sentidos de escoamento .....	80
Figura 4.11: Curvas de potência de eixo por velocidade do escoamento nos dois sentidos de estudo .....	81
Figura 4.12: Curvas de coeficiente de potência por razão de velocidade na ponta da pá para escoamento nos dois sentidos estudados .....	82
Figura 4.13: Curvas de coeficiente de potência por razão de velocidade na ponta da pá para diversos tipos de turbina de fluxo livre, com adição dos resultados numéricos para a turbina aqui estudada, com escoamento no sentido de projeto (curva azul) e no sentido oposto (curva vermelha) .....	83
Figura 4.14: Variação da rotação de acordo com o diâmetro para se manter a razão de velocidades na ponta da pá de acordo com o modelo reduzido.....	86
Figura 4.15: Curvas de potência de eixo por velocidade de escoamento para o modelo reduzido e para protótipos de diferentes dimensões .....	86
Figura 4.16: Curvas que relacionam a potência de eixo e o diâmetro de rotor necessário, considerando velocidade de escoamento constante.....	87
Figura A. 1: Representação dos volumes de controle considerados para cálculo do número de Betz .....	111
Figura A. 2: Distribuição de pressões ao longo do tubo de corrente, a descontinuidade nas pressões ocorre no $VC_{II}$ .....	112
Figura A. 3: Contornos de pressão (a) sentido de projeto; (b) sentido oposto.....	114

Figura A. 4: Contornos de velocidade no plano XY para (a) sentido de projeto, (b) sentido oposto .....	115
Figura A. 5: Linhas de corrente de velocidade de escoamento a partir da entrada do rotor (a) sentido de projeto; (b) sentido oposto .....	116
Figura A. 6: Comportamento da turbulência num plano XY (a) sentido de projeto; (b) sentido oposto .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura A. 7: definição da simbologia para o perfil em chapa circular considerado para projeto da pá .....	120
Figura A. 8: Dimensões para construção da ogiva considerada no projeto .....	120
Figura A. 9: Contornos de magnitude de velocidade no entorno do rotor para $v=1,5$ m/s para os casos (a) rotor de pás planas (b) rotor de pás curvo-torcionadas .....	122
Figura A. 10: Curvas de coeficiente de potência por razão de velocidade da ponta da pá para rotor com pá plana e rotor com pá curvo-torcionada.....	123

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

- Tabelas

Tabela 4.1: Principais valores finais de máximo $C_p$ para cada caso considerado .....	68
Tabela 4.2: Configurações do computador utilizado para simulações numéricas .....	73
Tabela 4.3: Dados referentes às potências máximas das simulações.....	79
Tabela 4.4: variação da potência de eixo máximo entre o sentido de projeto e o sentido reverso para cada velocidade de escoamento .....	80
Tabela 5.1: Sumário de resultados das simulações .....	90
Tabela A. 1: Acesso à eletricidade nos domicílios no ano 2000.....	117
Tabela A. 2: Acesso à eletricidade nos domicílios no ano 2010.....	118
Tabela A. 3: Dados de projeto - rotor de pás curvo-torcionadas .....	119
Tabela A. 4: Valores de interesse para os pontos de maior $C_p$ . Para os casos de pás planas e pás curvo-torcionadas .....	121

- Quadros

Quadro 2.1: Sumário da legislação nacional associada à geração distribuída .....	30
Quadro 2.2: informações de turbinas hidrocínéticas fluviais no mundo.....	48
Quadro 3.1: Adaptação dos TRL para turbinas hidrocínéticas .....	57
Quadro A. 1: Nomenclatura dos parâmetros de projeto do rotor de pás curvo-torcionadas .....	120

## SIMBOLOGIA

- Acrônimos

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARENA	<i>Australian Renewable Energy Agency</i>
BEN	Balanco Energético Nacional
CAIT	<i>Climate Analysis Indicators Tool</i>
COP21	21ª Conferência das Partes
EMEC	<i>European Marine Energy Centre</i>
EMEC	<i>European Marine Energy Centre</i>
INCT	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
INEOF	Instituto Nacional de Energias Oceânicas e Fluviais
INPA	Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
REN	Resolução Normativa
SEB	Setor Elétrico Brasileiro
SIN	Sistema Interligado Nacional
Sipot	Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro
Unifei	Universidade Federal de Itajubá

- Siglas

IEA	<i>International Energy Agency</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GD	Geração distribuída
GEE	Gases de Efeito Estufa
LHV	Laboratório de Hidromecânica Virtual (Unifei)
ONS	Operador Nacional do Sistema
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
SFMRE	<i>Special Funds for Marine Renewable Energy (China)</i>
SST	<i>Shear Stress Transport</i>

TRL	<i>Technology Readiness Level</i>
UFMA	Universidade Federal do Maranhão
UFPA	Universidade Federal do Pará
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia
UNB	Universidade de Brasília
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
VCEA	<i>Virginia Clean Economy Act</i>

- Símbolos – alfabeto latino

A	Área ocupada pelo rotor, transversal ao escoamento
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
C <sub>p</sub>	Coefficiente de Potência
C <sub>s</sub>	Coefficiente de sustentação
C <sub>u</sub>	Projeção da velocidade absoluta na saída (C6) sobre a direção da velocidade circunferencial (u)
D	Diâmetro
D <sub>e</sub>	Diâmetro externo do rotor
D <sub>p</sub>	Densidade de potência
E <sub>c</sub>	Energia Cinética
f	Arqueamento
F <sub>D</sub>	Força de Arrasto
F <sub>L</sub>	Força de Sustentação
F <sub>N</sub>	Componente de força normal ao plano de rotação
F <sub>T</sub>	Componente de força tangencial ao movimento da pá
l	Corda
m	Massa
Ma	Número de Mach
n	Rotação
p	Pressão
P	Potência
P <sub>disp</sub>	Potência disponível numa determinada área transversal ao escoamento

$P_e$	Potência de Eixo
$P_{gerada}$	Potência na saída do gerador elétrico
$R$	Raio do rotor
$r_a$	Raio da pá
$Re_c$	Número de Reynolds com base na corda
$S_M$	Fonte de torque
$T$	Trabalho mecânico
$t$	Tempo
TSR ou $\lambda$	Razão de velocidade de ponta da pá ( <i>Tip Speed Ratio</i> )
$u$	Velocidade tangencial do escoamento
$v$	Velocidade absoluta do escoamento
VC	Volume de controle
$w$	Velocidade relativa do escoamento
$w_\infty$	Velocidade relativa média

- Símbolos – alfabeto grego

$\delta$	Ângulo de ataque
$\delta_{ij}$	Delta de Kronecker
$\alpha_6$	Ângulo de saída formado entre os vetores $c_6$ e $u$
$\beta_\infty$ ou $\beta$	Ângulo entre $w_\infty$ e $u$
$\eta_{el}$	Rendimento do gerador elétrico
$\eta_{mec}$	Rendimento mecânico do conjunto
$\theta$	Ângulo de passo da pá
$\lambda$ ou TSR	Razão de velocidade de ponta da pá ( <i>Tip Speed Ratio</i> )
$\mu$	Viscosidade dinâmica
$\rho$	Massa específica
$\tau$	Tensor das tensões viscosas
$\varphi$	Ângulo da velocidade relativa
$\omega$	Velocidade angular do rotor

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. Introdução .....	1
1.1. Hipótese e Justificativa .....	2
1.2. Objetivos .....	3
1.2.1. Objetivos específicos .....	3
1.3. Metodologia e estrutura do trabalho .....	4
CAPÍTULO 2. Contextualização.....	7
2.1. Matriz Energética e Elétrica .....	7
2.1.1. Matriz Energética .....	7
2.1.2. Matriz Elétrica .....	10
2.2. Sistema Interligado Nacional.....	15
2.2.1. Potencial Hidrelétrico – Usinas Convencionais .....	16
2.2.2. Universalização do acesso à eletricidade. ....	19
2.3. Transição Energética.....	22
2.3.1. Transição energética como meio para desenvolvimento.....	27
2.4. Geração distribuída .....	29
2.5. Aproveitamento da energia hidrocínética – Questões técnicas.....	37
2.5.1. Generalidades .....	37
2.5.2. Equacionamento básico .....	41
2.5.3. Aplicações de turbinas hidrocínéticas. ....	44
2.5.3.1. Aplicações no Brasil.....	45
2.5.3.2. Aplicações no Mundo.....	47
CAPÍTULO 3. Considerações sobre desenvolvimento tecnológico de Turbinas Hidrocínéticas	52
3.1. Avaliação de maturidade Tecnológica de turbinas hidrocínéticas.....	53



3.1.1.	Níveis de Maturidade tecnológica.....	53
3.1.2.	Adaptação dos TRL para turbinas hidrocínéticas.....	56
3.1.3.	Questões técnicas para progresso na escala TRL.....	59
3.2.	Base teórica e considerações para simulações numéricas.....	61
3.2.1.	Princípios fundamentais .....	62
3.2.2.	Modelo de turbulência.....	63
3.2.3.	Malha Computacional .....	64
CAPÍTULO 4. Estudo De caso .....		66
4.1.	Apresentação do projeto estudado .....	67
4.1.1.	Rotor hidrocínético pás curvo-torcionadas e ogiva.....	67
4.1.2.	Considerações de projeto para o presente trabalho .....	68
4.1.3.	Avaliação do nível de maturidade tecnológica.....	71
4.2.	Simulações Numéricas.....	72
4.2.1.	Métodos das simulações .....	73
4.2.1.1.	Casos simulados .....	76
4.3.	Resultados e discussão.....	77
4.3.1.	Escoamento no sentido do projeto original – comparação com trabalho anterior .....	77
4.3.2.	Comparação de resultados para os dois sentidos.....	78
4.3.3.	Resultados adimensionais e semelhança .....	81
CAPÍTULO 5. Conclusões.....		88
5.1.	Sumário de Resultados.....	89
5.2.	Trabalhos Futuros .....	90
Referências.....		93
APÊNDICE A Limite de Betz.....		111
APÊNDICE B Resultados numéricos – comportamento do escoamento .....		114
ANEXO A Tabelas do IBGE: Acesso à eletricidade .....		117

ANEXO B	Dados de projeto do rotor com pás curvo-torcionadas .....	119
ANEXO C	Principais resultados das simulações numéricas do rotor de pás curvo-torcionadas .....	121

## CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

O homem modifica, ao longo de sua história, a maneira com que aproveita os recursos naturais para realização de atividades, aumento de seu bem-estar e sobrevivência. Assim, desde o controle do fogo até o desenvolvimento tecnológico contemporâneo o uso de fontes de energia altera o meio ambiente, a formação social e a própria natureza humana.

Como exemplo, Heidegger (2001) aduz a alteração da lógica social e técnica vivenciada na modernidade a partir da diferença entre a concepção de energia e das suas técnicas de aproveitamento em antigos moinhos e na usina hidrelétrica do rio Reno. No primeiro caso, o aproveitamento era local e diretamente da potência de eixo, sem armazenamento ou transporte de energia a longas distâncias. Já na usina hidrelétrica a cadeia é extensa, o rio passa a existir com a função de fornecer energia potencial a ser transformada em energia cinética e depois em potência de eixo pela alteração na quantidade de movimento do fluido ao passar pela turbina hidráulica, que fornece torque para criar movimento relativo entre o estator e o rotor de um gerador elétrico gerando diferença de potencial elétrico, a corrente elétrica é então fornecida à rede de transmissão a longas distâncias que abastece a rede de distribuição até o consumo final da eletricidade com a transformação em outra forma de energia. Com a extensão muitas vezes intangível dessa cadeia energética, o rio passa a ser definido a partir da usina, a técnica passa a ser o fim e não mais o meio. A alteração dessa lógica, motora da sociedade, apontada por Heidegger com o citado exemplo de aproveitamento energético, transformou o mundo no que o autor chamou de “mundo da técnica” (Heidegger apud DUARTE, 2019, p. 87), o mundo moderno.

A relação do homem com a técnica continua e continuará se modificando de acordo com o desenvolvimento da humanidade, inclusive na questão da utilização de energia. Impactos ambientais e sociais têm ganhado ênfase nas decisões do setor energético, sendo possível observar uma alteração conjuntural crescente. Nesse contexto, o desenvolvimento de novas tecnologias para aproveitamento energético se mostra interessante.

Este trabalho busca contribuir no empenho para implementação turbinas hidrocínéticas no Brasil. É apresentado um estudo de caso, com a avaliação de rotor hidrocínético operando com escoamento no sentido de projeto e no sentido reverso. É feita também uma avaliação de maturidade tecnológica, seguindo parâmetros de *Technology Readiness Levels* (TRL), conceito utilizado amplamente para tecnologias de diversas áreas de conhecimento.

O trabalho parte da consciência da complexidade crescente dos aproveitamentos energéticos humanos. Considerando que as atuais mudanças no setor energético ocorrem

principalmente devido a políticas públicas e não a avanços tecnológicos (BLAZQUEZ, FUENTES, *et al.*, 2020), faz-se necessário apresentar, mesmo que com o mínimo de robustez, o contexto institucional, técnico e social para aplicação dessa tecnologia que ainda apresenta suas primeiras aplicações de larga-escala no mundo, na intenção de instigar pesquisas futuras relacionadas a turbinas hidrocínéticas e suas possibilidades de estabilização na sociedade.

### **1.1. HIPÓTESE E JUSTIFICATIVA**

A hipótese estudada para elaboração do presente trabalho é a possibilidade de operar um rotor hidrocínético previamente projetado por Bolaños (2015) em escoamento em duas direções não simultâneas com análise da queda de rendimento ao se operar o rotor em fluxo reverso. O projeto de Bolaños foi desenvolvido considerando a possibilidade de utilização de rotores em série, ideia inicialmente apresentada por Tiago Filho *et al.* (2010). Para avaliação da hipótese apresentada, o presente trabalho estuda a utilização de rotor único ora em operação com escoamento no sentido de projeto, ora no sentido oposto, o período transiente não é considerado. A hipótese é inserida num contexto de engenharia de produto, ou seja, o trabalho propõe ainda verificar qual a metodologia necessária para que o projeto do rotor ganhe continuidade e possa ser efetivamente desenvolvido e tenha aplicações reais.

Considerando que a literatura sobre turbinas hidrocínéticas ainda não está plenamente desenvolvida (SOOD, SINGAL, 2019), e que o uso de tecnologias renováveis no setor elétrico é cada vez mais imprescindível face às preocupações com a influência humana no clima do planeta (CAGLAR, 2020), trabalhos que envolvam pesquisa sobre o projeto e inovações relativas a rotores hidrocínéticos são cientificamente relevantes e podem adquirir aplicação prática em benefício da sociedade. Turbinas hidrocínéticas podem ser aplicadas em larga ou pequena escala, em oceanos, estuários e rios, tendo amplo campo para desenvolvimento tecnológico.

As turbinas hidrocínéticas no mundo se apresentam principalmente em fase de pesquisa e desenvolvimento, particularmente se tratando de turbinas para aplicação oceânica, geralmente pensada para turbinas de grande porte. Por outro lado, o desenvolvimento de turbinas de menor porte pode ser benéfico se tratando de eletrificação de regiões isoladas. Assim, o campo para a pesquisa de turbinas hidrocínéticas é de interesse em diversos contextos.

Para que ocorra desenvolvimento tecnológico nacional é imprescindível que sejam realizadas pesquisas em diversas áreas de conhecimento, que podem se beneficiar de abordagens transdisciplinares. Muitas questões de interesse aos projetistas precisam ser ainda

levantadas, como potencial hidrocínético disponível no país e características de escoamento em locais de interesse. É necessária ainda a racionalização do processo de desenvolvimento tecnológico, em busca de mitigar a lacuna existente entre as tecnologias internacionais e o que vem a ser projetado nacionalmente e de buscar aplicações factíveis de turbinas hidrocínéticas em contextos locais.

Justifica-se assim a presente pesquisa, pela contribuição científica no estudo de rotores hidrocínéticos, com a inovação de aplicação de um rotor projetado por Bolaños (2015); pela possibilidade de desenvolvimento tecnológico já que poucas turbinas estão completamente desenvolvidas no mundo; pela necessária racionalização do processo de desenvolvimento tecnológico, em busca de promover progresso nacional e a aplicabilidade efetiva de turbinas hidrocínéticas.

## **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo geral do presente trabalho é apresentar um estudo de comportamento de um rotor axial hidrocínético operando escoamento no sentido original de projeto e no sentido oposto, alternadamente, para verificar a possibilidade de operação nessas condições a partir da análise dos dados de perda de rendimento do rotor operando fluxo no sentido reverso.

### **1.2.1. Objetivos específicos**

Entre os objetivos específicos estão:

- Analisar as necessidades e possibilidades do contexto brasileiro para desenvolvimento de novas tecnologias de aproveitamento energético renovável de baixo impacto ambiental e possível benefício social.
- Apresentar o estado da arte relacionado ao potencial de aplicação de turbinas hidrocínéticas no Brasil.
- Apresentar uma metodologia para a pesquisa e desenvolvimento de turbinas hidrocínéticas considerando questões técnicas, a partir da classificação em níveis de maturidade tecnológica (TRL – *Technology Readiness Levels*).
- Desenvolver um estudo de caso, a partir de projeto de rotor hidrocínético elaborado por Bolaños (2015), considerando agora escoamento em dois sentidos, com o rotor operando no sentido direto e reverso.
- Avaliar o desempenho da turbina estudada e apresentar estudos futuros de interesse para o desenvolvimento dessa tecnologia.

### 1.3. METODOLOGIA E ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho propõe a avaliação de um rotor hidrocínético operando com fluxo em dois sentidos. Para essa avaliação a metodologia utilizada é sintetizada no fluxograma apresentado na Figura 1.1, a seguir.

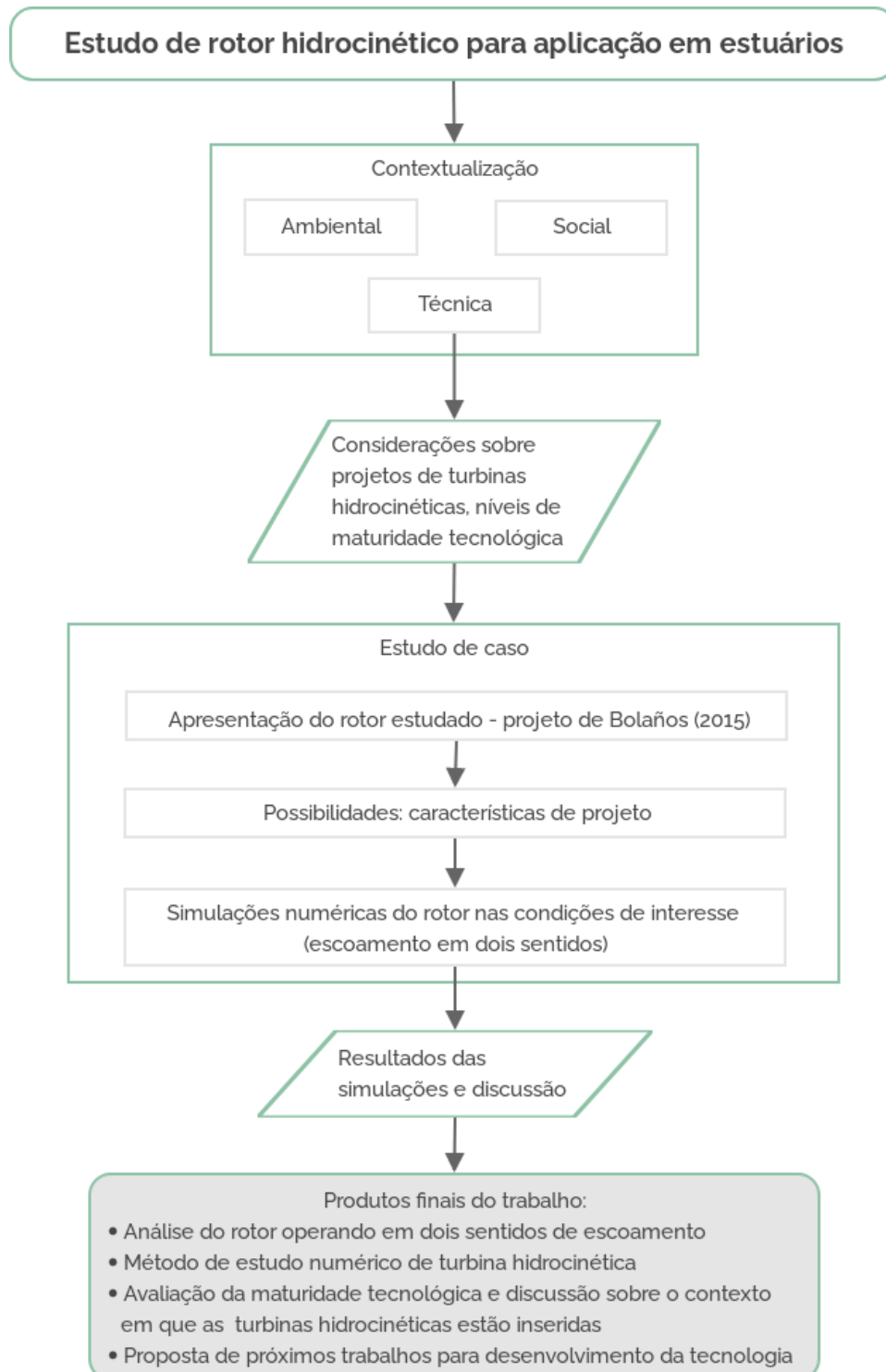


Figura 1.1 Fluxograma representando a metodologia geral do trabalho

Fonte: Elaboração própria

Conforme apresentado na Figura 1.1, o estudo começa com o levantamento do contexto ambiental, social, e técnico abordado a partir de dados mundiais e nacionais. Considerando que as tecnologias não existem isoladas da sociedade, é de interesse analisar a tecnologia que se pretende desenvolver dentro de um contexto material da sociedade, o que inclui também a situação ambiental.

Esses assuntos compõem o segundo capítulo deste trabalho, para contextualização. Trata-se de um levantamento de questões que envolvem e direcionam ou não para a adoção efetiva de turbinas hidrocínéticas para aproveitamento energético. Essas questões passam inicialmente pelas matrizes energéticas e elétricas mundiais e brasileiras. Então, é apresentado o caso do setor elétrico brasileiro que tem o Sistema Interligado Nacional como estrutura principal e características peculiares como a base de geração predominantemente hidrelétrica, com ainda elevado potencial hidrelétrico remanescente. Em sequência aborda-se a questão contemporânea e mundial da transição energética para um sistema de menores danos ambientais, sendo essa uma das forças motrizes para o estudo de novas tecnologias para geração de eletricidade e para mudanças de paradigmas no setor elétrico, como é o caso da Geração Distribuída, assunto tratado a seguir. Os últimos temas abordados na seção são a própria energia hidrocínética e seu aproveitamento, numa abordagem técnica e a consideração sobre os poucos estudos no país do potencial hidrocínético em território brasileiro, escassez agravada quando se trata de aplicação em estuários.

O terceiro capítulo apresenta considerações sobre projeto de turbinas hidrocínéticas. É apresentada uma proposta de avaliação da maturidade tecnológica de turbinas hidrocínéticas, a partir de um conceito já amplamente utilizado para outras tecnologias, inclusive de geração de eletricidade, os *Technology Readiness Levels* (TRL). É traçado um esquema de engenharia de produto, identificando a importância das simulações numéricas para o estudo de novas turbinas. Finaliza-se a seção com a apresentação da base teórica das simulações numéricas que são realizadas neste trabalho.

Feito isso, considera-se um estudo de caso no quarto capítulo do trabalho. Opta-se pelo estudo de um rotor projetado por Germán Alejandro Ibarra Bolaños (BOLAÑOS, 2015), inicialmente projetado para operar em fluxo contínuo em uma direção e sentido, operando com escoamento em duas direções, caso que não foi estudado anteriormente. O estudo de caso proposto na presente pesquisa aduz a avaliação da maturidade do projeto do rotor, propõe o novo estudo e apresenta simulações numéricas do desempenho do rotor em escoamento livre.

As simulações foram realizadas utilizando o programa ANSYS CFX® e os métodos utilizados são apresentados na seção 4.2.1, página 73 do presente trabalho. Os resultados

principais do estudo de caso são o levantamento de curvas de Coeficiente de Potência. É feita, então, uma comparação com dados de outras turbinas encontrados na literatura e é identificado o TRL atingido.

A partir dos resultados obtidos nas simulações numéricas é feita análise e discussão sobre o projeto, identificando então a maturidade tecnológica do projeto após o estudo desenvolvido neste trabalho. A última seção de conteúdo conclui o trabalho e apresenta possibilidades futuras de estudos.



## **CAPÍTULO 2. CONTEXTUALIZAÇÃO**

Para ampliar os estudos de turbinas hidrocínéticas, assim como o de qualquer nova tecnologia de aproveitamento energético, é necessário compreender o conjunto de circunstâncias sociais, institucionais, técnicas em que a tecnologia se insere. Este segundo capítulo do trabalho trata desse contexto, a fim de promover a necessária crítica dos setores energético e elétrico, a partir de revisão da literatura.

### **2.1. MATRIZ ENERGÉTICA E ELÉTRICA**

A utilização de fontes de energia encontradas na natureza para realização de atividades humanas vem sendo desenvolvida ao longo dos séculos pela nossa espécie. A cronologia da história humana pode, inclusive, ser dividida em diversos períodos de acordo com os diferentes aproveitamentos energéticos - desde o domínio do fogo para cocção, possivelmente dois milhões de anos antes de Cristo, até a era dos combustíveis fósseis, na qual vivemos hoje (VALAVANIDIS, VLACHOGIANNI, 2013). O aproveitamento energético moderno está associado a importantes conquistas materiais do homem, mas existem impactos sociais e ambientais nos diferentes usos energéticos, além da indiscutível desigualdade que o mundo apresenta no proveito dos benefícios materiais.

Analisar os dados de fornecimento energético por fonte permite avaliar como o setor energético tem sido desenvolvido, além de permitir discussões técnicas para as ações futuras no setor. Dentro do setor energético, o setor elétrico tem importância crescente, a partir das matrizes energética e elétrica é possível analisar a situação atual do aproveitamento de fontes renováveis e propor possibilidades futuras.

#### **2.1.1. Matriz Energética**

A existência humana implica a utilização de energia em diferentes formas e de diversas fontes, para diversos fins. Matriz energética é o conjunto das fontes de energia que compõe a utilização humana para realização de atividades (incluindo transporte, cocção, consumo elétrico, etc). Como a utilização energética dos países depende de suas características de geografia humana e física, diferentes fontes energéticas são utilizadas ao redor do mundo. O avanço da matriz energética mundial entre 1990 e 2018 é apresentado na Figura 2.1, com dados da *International Energy Agency*, IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020b).

### Matriz Energética Mundial de 1990 a 2018

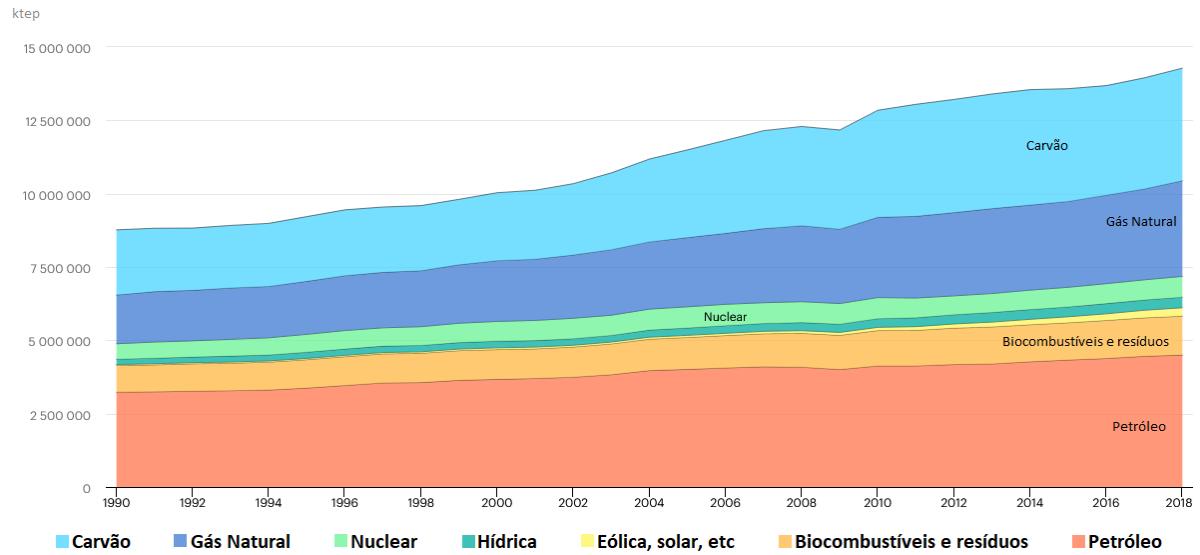


Figura 2.1: Desenvolvimento da matriz energética mundial de 1990 a 2018  
Fonte: IEA adaptado (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020b)

O detalhamento da participação por fonte na matriz energética mundial no ano de 2018 é apresentada na Figura 2.2.

### Matriz energética mundial em 2018

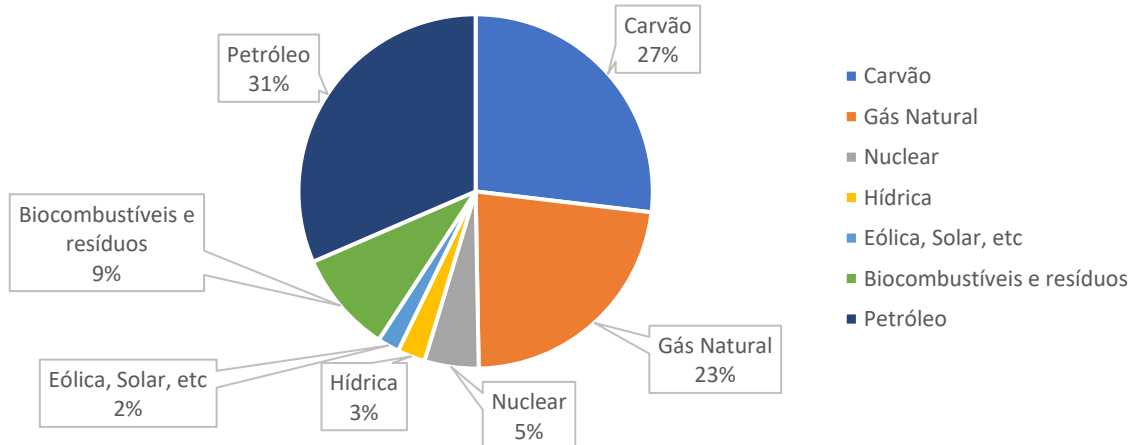


Figura 2.2: Participação por fonte na matriz energética mundial em 2018  
Fonte: Elaboração própria, dados da IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020b)

A variação no consumo energético depende do contexto do país, muitos países têm grandes desafios em viabilizar a utilização de fontes de energia adequadas a suas populações. Por exemplo, a utilização de biomassa (lenha) para cocção está associada a baixos níveis de desenvolvimento e é causa de dificuldades e problemas de saúde e redução na escolaridade de mulheres ao redor do mundo (UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME - UNDP, 2000). Um exemplo corriqueiro no Brasil é o aumento no uso de lenha para cocção

atrelado a aumentos do preço do gás de cozinha e do desemprego (GANDRA, 2019, PAMPLONA, ALBUQUERQUE, 2018).

O desenvolvimento da matriz energética brasileira entre 1990 e 2018 é apresentado na Figura 2.3. É interessante notar a redução na oferta total de energia associada a períodos de crises econômicas (conhecidamente, a crise mundial de 2008 e a recessão nacional de 2015-2016).

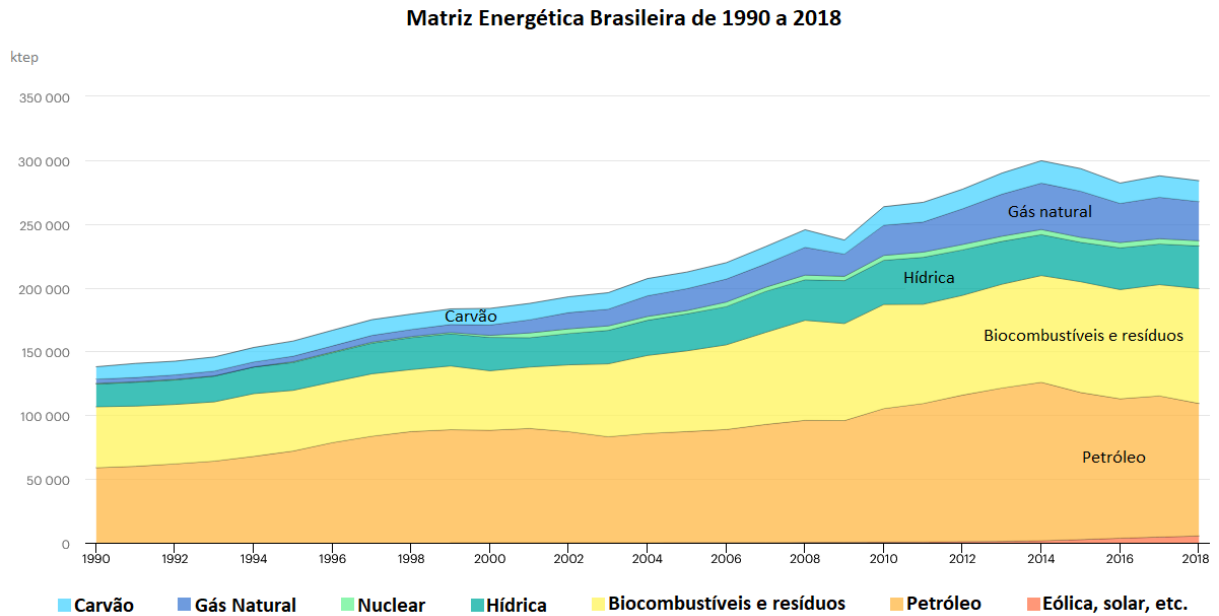


Figura 2.3: Desenvolvimento da matriz energética brasileira de 1990 a 2018  
 Fonte: IEA adaptado (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020b)

O detalhamento da participação por fonte na matriz energética brasileira no ano de 2018 é apresentado na Figura 2.4, a seguir.

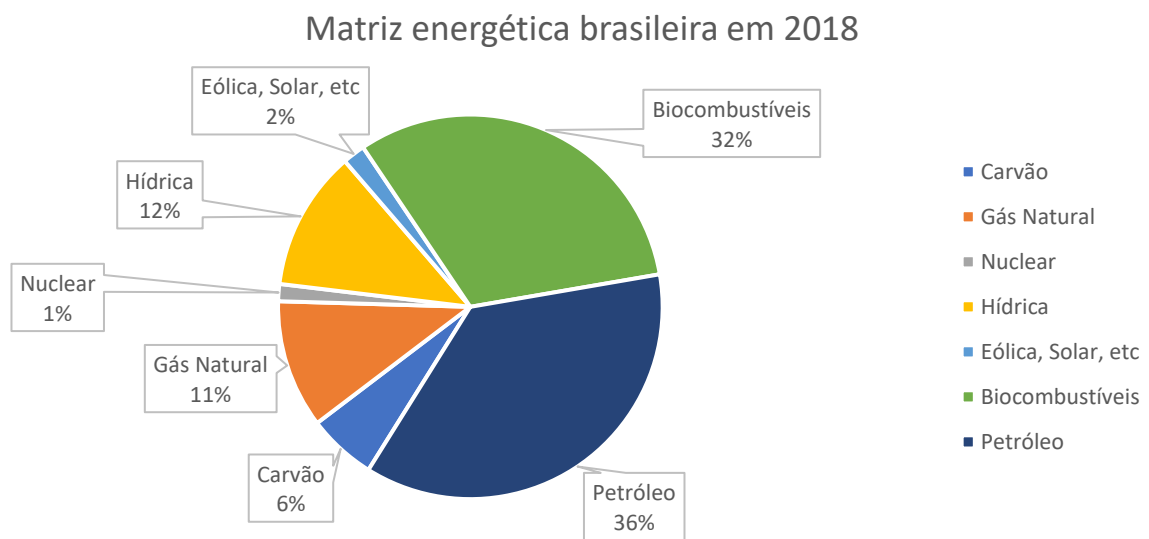


Figura 2.4: Participação por fonte na matriz energética brasileira em 2018  
 Fonte: Elaboração própria, dados da IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020b)

Na comparação entre as matrizes energéticas mundial e nacional do ano de 2018 (Figura 2.2 e Figura 2.4, respectivamente) nota-se a clara peculiaridade da matriz brasileira. O Brasil apresentou em 2018 45,4% de energia ofertada a partir de fontes renováveis (soma das fontes hidráulica, biocombustíveis, biomassa, eólica, solar, etc), enquanto no mundo a parcela energia de fontes renováveis foi de apenas 13,8%. Portanto, o Brasil apresenta mais de três vezes a participação proporcional de energias renováveis na matriz energética em comparação com o mundo, característica favorável ao país para discussões internacionais a respeito de sustentabilidade.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) foi criada em 2004 (BRASIL, 2004b) para atuação na área de estudos e pesquisas direcionados ao planejamento energético nacional. A EPE disponibiliza anualmente os dados referentes a oferta e demanda de energia no Balanço Energético Nacional (BEN) do Brasil. Os dados da IEA referentes ao Brasil foram preferidos em relação aos dados da EPE para elaboração dos gráficos dessa seção para adequada comparação com os dados mundiais, visto que a EPE não é responsável pelo processamento de dados internacionais e pelo maior detalhamento nas fontes. Para conhecimento, em 2019, de acordo com o Ministério de Minas e Energia (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2020), a matriz energética brasileira foi 46,1% renovável.

### **2.1.2. Matriz Elétrica**

A eletricidade é uma das formas de energia que o homem utiliza e tem duas características que a tornam especialmente importante: a possibilidade de transmissão a longas distâncias e a facilidade de conversão em outras formas de energia. O consumo de eletricidade, assim como o de energia, é crescente no mundo, mas ainda existe grande disparidade no acesso e consumo de eletricidade de acordo com localizações geográficas e condições econômicas. No mundo, de acordo com os dados mais recentes da IEA, referentes a 2018, 11,3% da população não tem acesso à eletricidade, o que significa aproximadamente 860 milhões de pessoas sem acesso. Ademais, a população sem eletricidade está distribuída desigualmente no globo, a África Subsaariana, por exemplo tem uma taxa de eletrificação apenas de 45% (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019a). Portanto, a expansão da matriz elétrica mundial não é só necessária, como inevitável ao se pensar num mundo mais igualitário e o estudo tanto da matriz elétrica existente quanto das possibilidades futuras é imprescindível.

Como supracitado, a matriz energética de um país leva em conta todas as fontes de energia disponíveis para o consumo energético nacional (que inclui transporte, geração de eletricidade,

aquecimento etc.). Já a matriz elétrica é composta especificamente pelas fontes disponíveis no país para geração de eletricidade para suprimento da demanda. A Figura 2.5 mostra a matriz elétrica mundial por fonte.

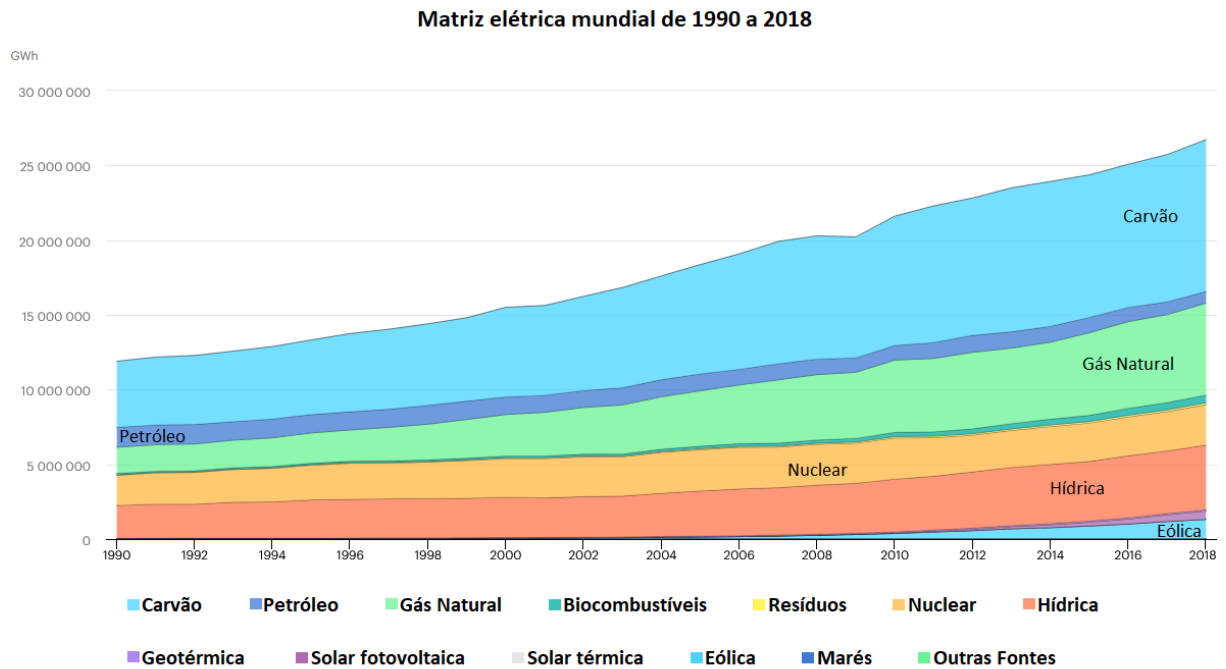


Figura 2.5: Desenvolvimento da matriz elétrica mundial de 1990 a 2018  
 Fonte: IEA adaptado (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020a)

A participação por fonte na matriz elétrica mundial em 2018 é apresentada na Figura 2.6. Nota-se que apenas 25,8% da energia elétrica gerada no mundo veio de fontes renováveis.

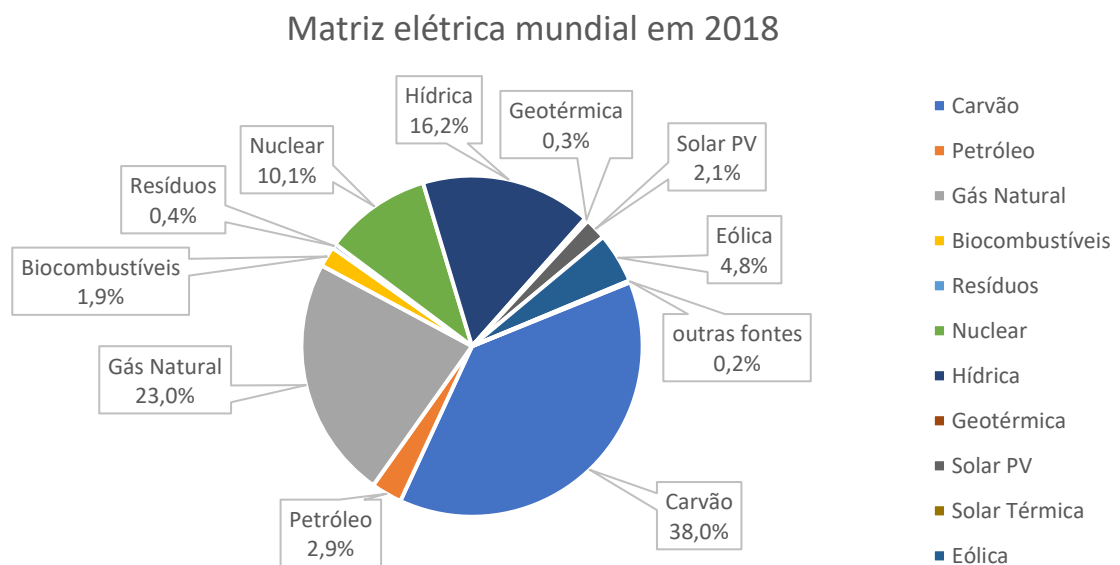


Figura 2.6: Participação por fonte na matriz elétrica mundial de 2018  
 Fonte: Elaboração própria, dados da IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020a)

Em contraste com o caso mundial, o Brasil possui uma matriz elétrica predominantemente renovável. A evolução da matriz elétrica brasileira entre os anos de 1990 e 2018 é apresentada na Figura 2.7, a seguir.

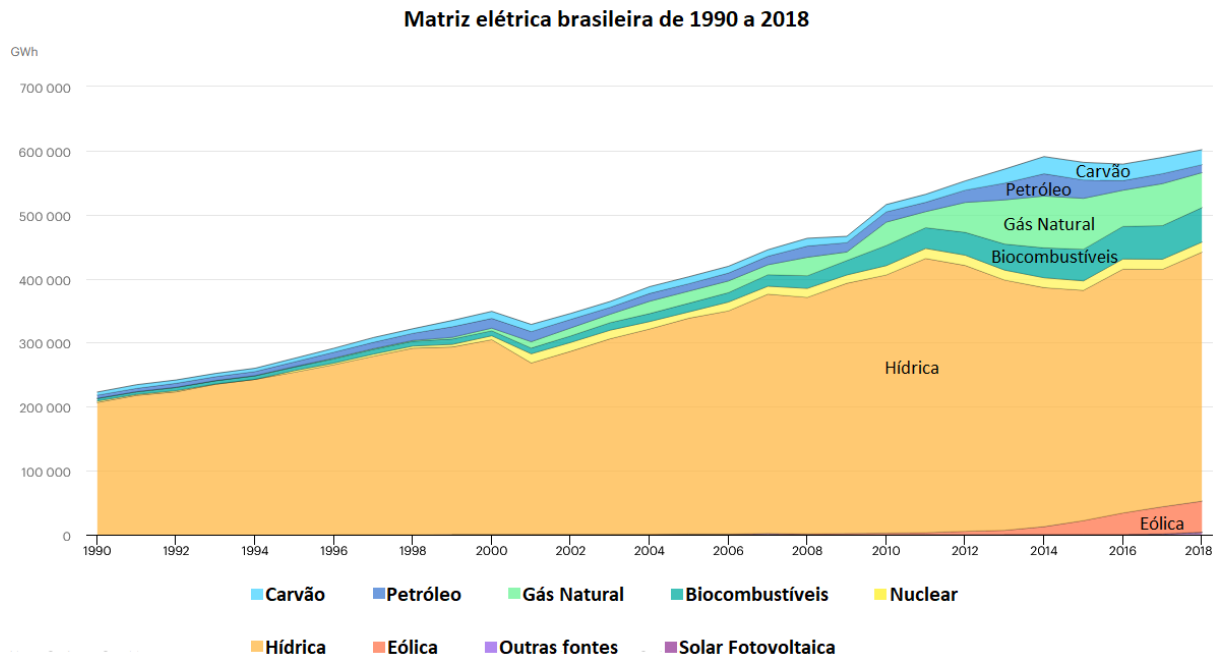


Figura 2.7: Desenvolvimento da matriz elétrica brasileira de 1990 a 2018  
Fonte: IEA adaptado (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020a)

As fontes renováveis foram responsáveis por 82,3% da geração de eletricidade no país em 2018 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020a), a distribuição das fontes para geração de eletricidade no Brasil em 2018 é apresentada na Figura 2.8.

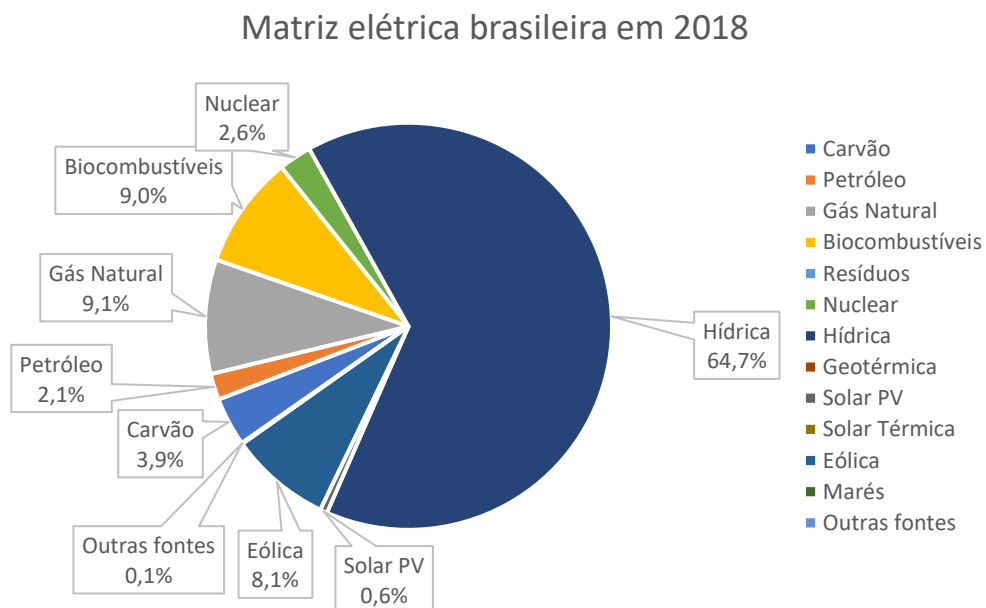


Figura 2.8: Participação por fonte na matriz elétrica brasileira de 2018  
Fonte: Elaboração própria, dados da IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020a)

Como observado na Figura 2.8, no contexto brasileiro a geração hidrelétrica tem papel predominante. Ela foi responsável por 78,6% da geração de fontes renováveis e 64,7% da geração total de eletricidade em 2018 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020a). A evolução

Complementarmente, na Figura 2.7 é possível notar a recente participação e crescimento expressivo da fonte eólica. A expansão da participação de uma certa fonte na matriz elétrica nacional mostra o amadurecimento tecnológico e de mercado dessa fonte. As políticas públicas têm papel imprescindível na expansão de qualquer fonte, renovável ou não, na matriz elétrica de um país. As diretrizes governamentais, através de medidas legais, determinam os incentivos e restrições à expansão das fontes para geração de eletricidade.

Devido não só às possibilidades naturais dos países, mas também às questões institucionais e diretrizes governamentais, os países têm diferentes matrizes energéticas e diferentes matrizes elétricas. A comparação da relação entre fontes renováveis e não-renováveis utilizadas no Brasil e no mundo no ano de 2018 é feita no gráfico da Figura 2.9 e mostra que o Brasil apresenta expressiva maior participação de fontes renováveis nas matrizes elétrica e energética em oposição ao cenário mundial.

### Comparação entre fontes das matrizes

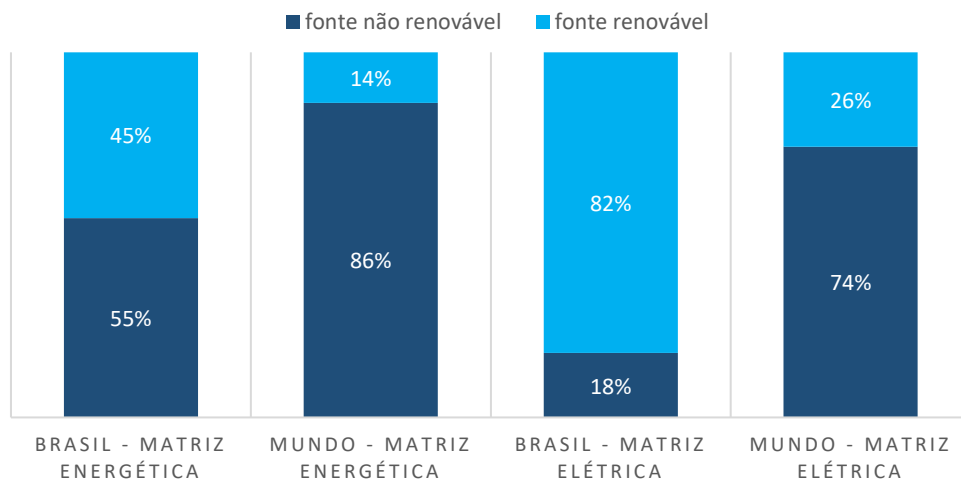


Figura 2.9: Comparação entre participações de fontes renováveis e não renováveis nas matrizes energética e elétrica no Brasil e no mundo para o ano de 2018

Fonte: Elaboração própria, dados da IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020a, b)

A expansão da geração é feita de acordo com as necessidades do país e com as diretrizes políticas adotadas. Com caráter informativo, a EPE disponibiliza o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), o último documento completo disponibilizado é o PDE 2029, mas a EPE adiantou em 2020 a disponibilização de estudos do PDE 2030, com considerações sobre a

pandemia de SARS-COV-2. No PDE 2029 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2020a), aponta-se atingir 81% da geração de eletricidade a partir de fontes renováveis em 2029, com participação de 51% da geração total de eletricidade a partir de fonte hídrica ( soma de usinas hidrelétricas de grande porte e pequenas centrais). A redução na participação da geração hidrelétrica indica maior variedade de fontes na matriz renovável e redução relativa de implementação de grandes usinas hidrelétricas.

É não só possível, como desejável pensar na expansão da matriz elétrica a partir de fontes renováveis, concomitantemente ao desenvolvimento tecnológico nacional para aproveitamento dessas fontes, além da transição da matriz energética para ampliação do aproveitamento de fontes renováveis. A ampliação da utilização de energia elétrica para fins que antes utilizavam outras formas de energia tende a contribuir também para essa alteração da matriz energética, pois torna possível a alteração na fonte primária de energia utilizada; como observado na Figura 2.9, as fontes primárias para geração de eletricidade têm expressiva participação de fontes renováveis mesmo no contexto mundial. É de interesse buscar alternativas que sejam ambiental e socialmente adequadas e comparar os mapas de potencial das fontes renováveis com as necessidades de cada área, para avaliar as possibilidades técnicas do potencial natural dentro do contexto relevante à humanidade.

Ampliar o aproveitamento dos recursos naturais renováveis existentes no Brasil de maneiras social e ambientalmente responsáveis é de interesse inclusive diplomático. Valorizar a frente do país no discurso mundial crescente da sustentabilidade é também ter em conta a importância que nossos recursos naturais têm. Como exemplo notório cita-se o acordo de Paris, no qual cada país participante, de acordo com as necessidades ambientais do mundo, assumiu responsabilidades de mitigação da ação humana na mudança climática (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU, 2015a), tema retomado na seção de Transição Energética.

A matriz elétrica do Brasil já apresenta características favoráveis para o diálogo internacional; apresentar propostas para manutenção e expansão de uma matriz elétrica sustentável, alinhar a um discurso ambiental uníssono nas diversas áreas econômicas - como, por exemplo, o agronegócio - e buscar atender as necessidades sociais, é um desafio que pode levar o país a um desenvolvimento também econômico no contexto mundial.

No âmbito prático e técnico, para que uma fonte de energia seja utilizada, um sistema conecta desde a geração da eletricidade (junto à fonte) até o consumo final. São possíveis sistemas desde os mais complexos aos simples e isolados. Cada país tem suas diretrizes e normas para que os consumidores finais tenham acesso à energia e, inclusive, possam gerar a própria energia.



## 2.2. SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

O Brasil é um país de extensão continental, formado por seis biomas distintos - Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, 2019), com diferentes níveis de urbanização e densidade demográfica em seu território e é um país pluriétnico, característica considerada em sua Constituição Federal. Essas complexidades e peculiaridades são importantes ao se analisar como é realizada a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no país. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) foi criada em 1996 e suas competências são definidas pela lei 9.427/1996 (BRASIL, 1996), sendo um órgão regulador e fiscalizador do setor elétrico brasileiro.

O Brasil conta com o Sistema Interligado Nacional (SIN), que é um sistema de produção e transmissão de energia elétrica. O sistema contém linhas de transmissão que passam por quase todos os estados da federação (exceto Roraima, que tem previsão de integração no futuro breve ao SIN) e que é dividido em quatro subsistemas: sul, sudeste/centro-oeste, nordeste e norte. O mapa do sistema de transmissão brasileiro, com representação das linhas de transmissão existentes e futuras de diferentes tensões é apresentado na Figura 2.10.

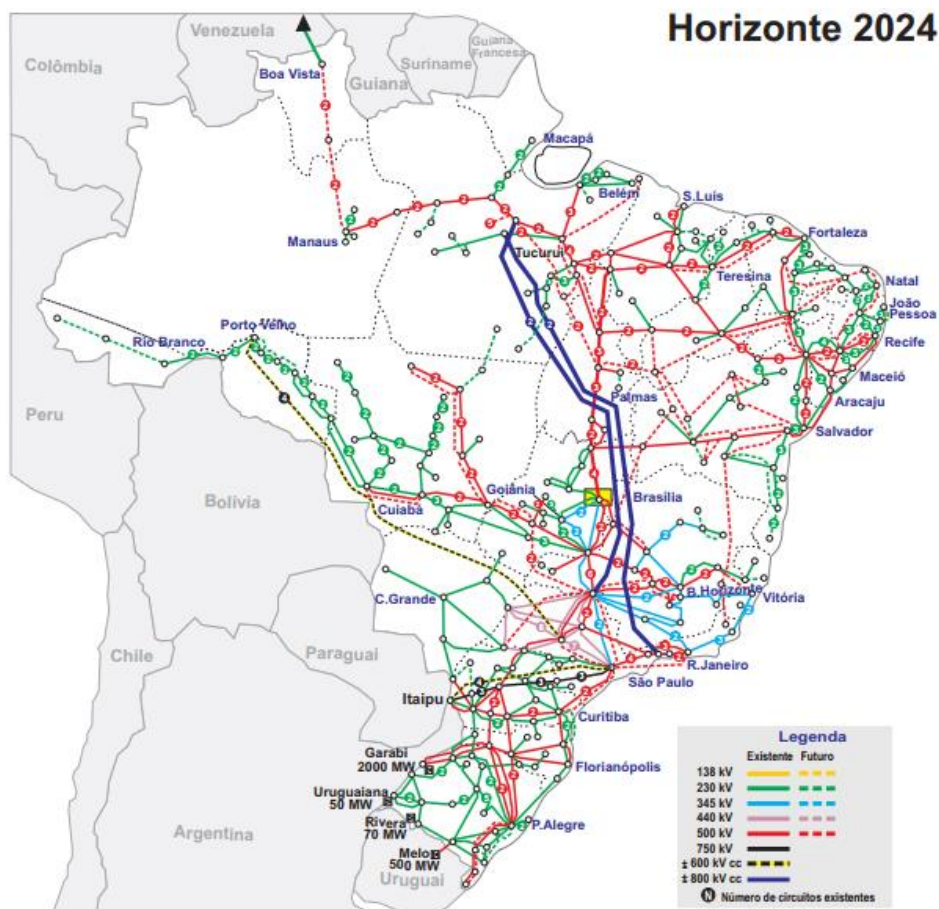


Figura 2.10: Mapa do sistema de transmissão do SIN, horizonte 2024  
Fonte: (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2020a)

O SIN está em constante modificação, com a expansão da matriz elétrica e, atualmente, é um sistema hidro-termo-eólico (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2020c). A interconexão dos sistemas elétricos, possível graças ao SIN, permite a transferência de energia nos subsistemas e, portanto, o aproveitamento da característica continental do país, com exploração dos recursos de acordo com as características de cada bioma e suas variações sazonais, a partir de um controle centralizado.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão que controla a operação das instalações de geração e transmissão do SIN, além de planejar a operação dos sistemas isolados - aqueles que não estão ligados ao SIN. O ONS foi criado em 1998 e suas competências estão definidas na lei 9.648/1998, alterada pela lei 10.848/2004, com regulamentação pelo decreto 5.081/2004; ademais, o ONS opera sob fiscalização e regulação da ANEEL. O órgão é, portanto, responsável pelo despacho das usinas hidrelétricas e térmicas ativas no SIN e as decisões de geração são tomadas a partir de estudos para otimização da operação e segurança energética, para garantia do fornecimento com o menor custo. São também responsabilidades do ONS assegurar que os agentes do setor tenham acesso à rede de forma não discriminatória e contribuir para que a expansão do SIN ocorra com o menor custo e para melhoria das condições operacionais futuras (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2020b).

### **2.2.1. Potencial Hidrelétrico – Usinas Convencionais**

O Brasil possui potencial hidrelétrico ainda não aproveitado para expansão da matriz elétrica que alimenta o SIN. Aqui aborda-se o potencial considerado para usinas convencionais, ou seja, com barragens, sendo de grande ou pequeno porte. A Eletrobras disponibiliza o Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro (SIPOT), do qual foi extraído e adaptado o mapa apresentado na Figura 2.11

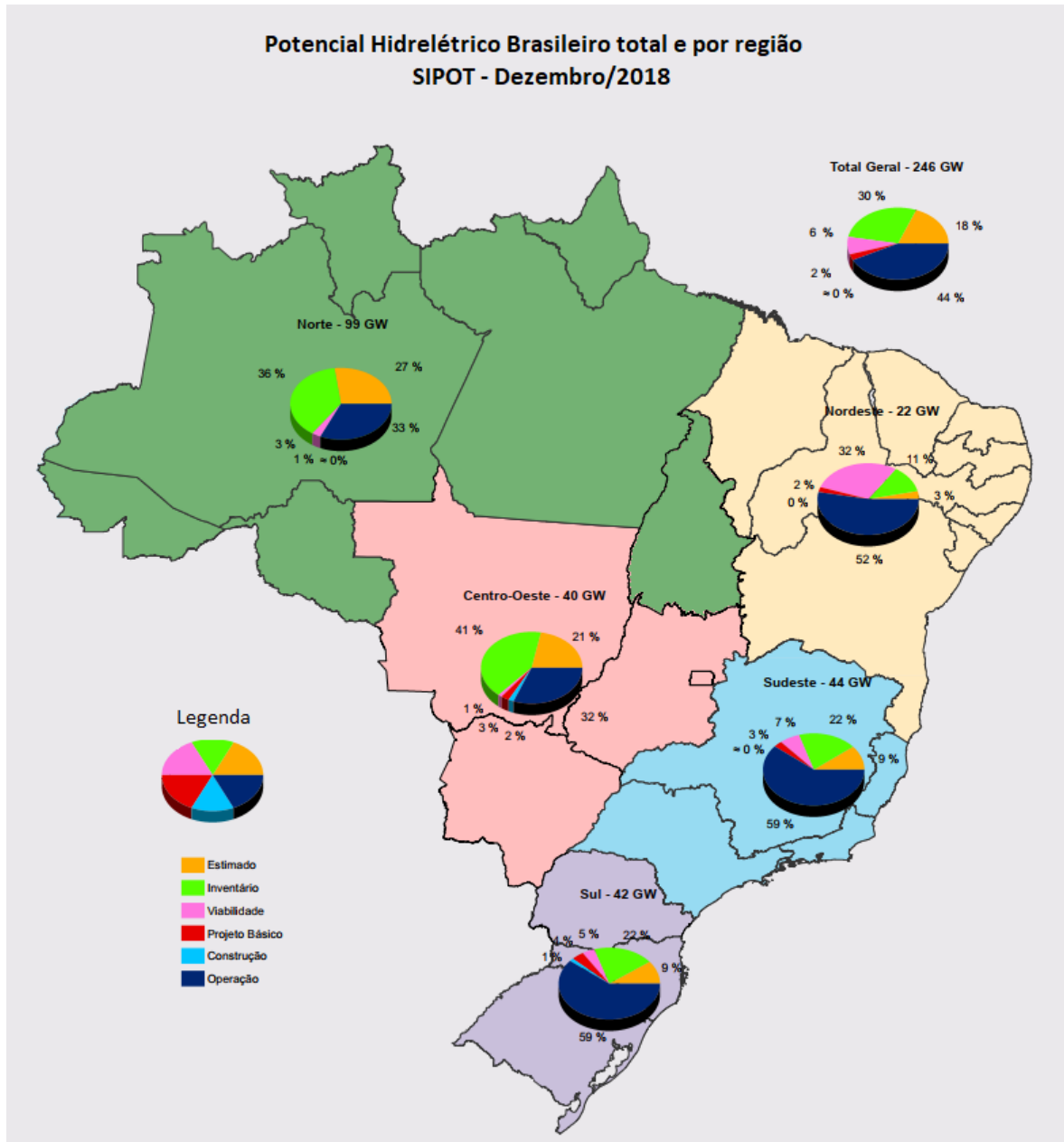


Figura 2.11: Distribuição do potencial hidrelétrico brasileiro por região  
Fonte: SIPOT adaptado (ELETROBRAS, 2018)

É possível observar, na Figura 2.11, que 40% do potencial hidrelétrico total brasileiro se encontra na região Norte, mas do potencial aproveitado, com usinas em operação, 30% do potencial se encontra nessa região, cujas usinas em operação representam aproximadamente 33% do potencial regional. O menor aproveitamento em usinas em operação aparece no centro-oeste, com aproximadamente 32% do potencial aproveitado. As regiões Sul, Sudeste e Nordeste apresentam aproveitamento acima de 50% do potencial em usinas em operação.

É importante perceber que 18% – ou aproximadamente 43,6 GW – do potencial total brasileiro, pelas considerações do SIPOT (ELETROBRAS, 2018), é referente ao potencial estimado. O potencial estimado tem elevado grau de incerteza e seu alto valor representa a

necessidade de estudos nacionais para levantamento de potencial hidrelétrico e expansão desse recurso na produção de eletricidade nacional.

Além disso, muito do potencial remanescente se localiza em áreas com populações tradicionais ou com elevado valor de fauna e flora, ou seja, áreas que são protegidas por lei, outra questão que deve ser considerada no planejamento da expansão da matriz hidrelétrica no país. Em publicação sobre as considerações para expansão hidrelétrica no longo prazo, a EPE (2018b) apresenta um estudo sobre a localização do potencial já inventariado para Usinas Hidrelétricas (UHEs), acima de 30MW, com relação à questão socioambiental. O total de potencial não explorado, mas inventariado, para UHEs apresentado pela EPE (2018) é de 52 GW. A Figura 2.12 apresenta um resumo dessas informações.

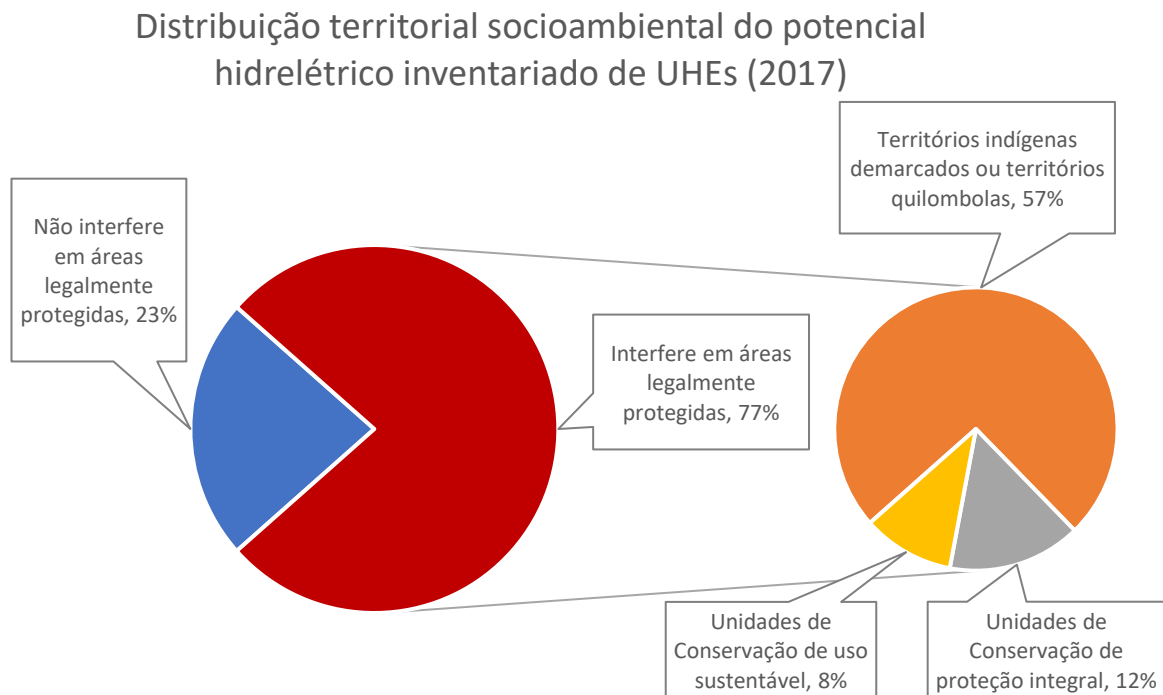


Figura 2.12: Distribuição socioambiental do potencial hidrelétrico inventariado para UHE's no território brasileiro, dados referentes a 2017

Fonte: elaboração própria a partir de dados da EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2018b)

Com relação a aproveitamentos em usinas com menos de 30MW de potência instalada, ou seja, em Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) e Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs); a EPE (2018) levantou 1.879 empreendimentos com potencial inventariado, o que representa 16 GW potencial. Para comparação atualmente, as PCHs e CGHs em operação somam aproximadamente 8 GW de potência instalada (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2020b).

### **2.2.2. Universalização do acesso à eletricidade.**

Como é possível observar na Figura 2.10, o SIN não é igualmente distribuído na extensão territorial brasileira, principalmente pelas diferentes densidades demográficas encontradas ao longo do país, distribuindo heterogeneamente a demanda no território. Assim, as linhas de transmissão de longa distância têm como objetivo ligar aproveitamentos energéticos – principalmente hidrelétricos e mais recentemente eólicos – aos principais pontos de consumo. Mas uma parcela da população brasileira, principalmente rural, não tem acesso à essa rede.

Como citam Castro *et al.* (2012), o planejamento do Setor Elétrico Brasileiro (SEB) têm como um dos objetivos traçados a partir da reestruturação do setor nos anos 2000, a universalização do acesso à eletricidade. Com a finalidade de universalização, dois programas foram marcantes no país: o programa Luz no Campo instituído pelo Decreto Presidencial de 02 de dezembro de 1999 (BRASIL, 1999), ainda seguindo diretrizes neoliberais que marcaram o SEB nos anos 90; e o programa que o substituiu, com novas diretrizes, o Luz para Todos instituído pelo Decreto n. 4.873 de 2003 (BRASIL, 2003). Na Figura 2.13 é apresentada a evolução da eletrificação comparando dados dos censos demográficos de 2000 e 2010 (dados mais recentes disponíveis).

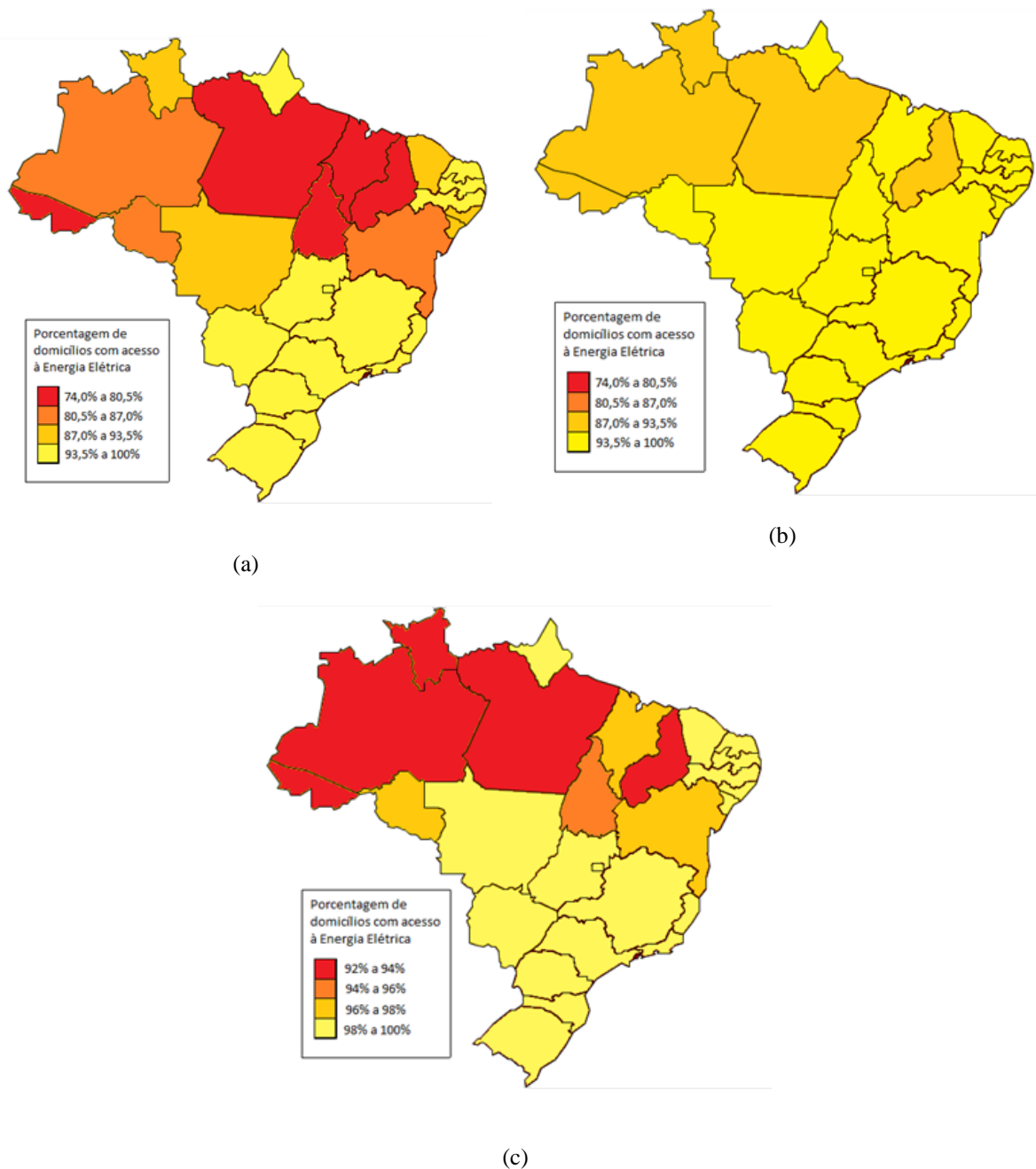


Figura 2.13: Gráficos de universalização do acesso à eletricidade. (a) dados do censo demográfico de 2000, escala de 74% a 100%. (b) dados do censo de 2010, com a mesma escala (c) dados do censo de 2010 com escala de 92% a 100% para melhor detalhamento.

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2000, 2010)

Comparando (a) e (b) da Figura 2.13 nota-se a expressiva evolução da eletrificação no país durante a primeira década dos anos 2000. O programa Luz para Todos foi criado inicialmente para vigência até 2008. O programa foi modificado e repetidamente adiado e, em 2018, foi assinado decreto prorrogando o programa até 2022 (BRASIL, 2018). Os dados utilizados para elaboração da Figura 2.13 devem ser atualizados em 2021 – o censo demográfico decenal foi adiado em um ano devido à pandemia de Sars-Cov-2. Os dados para elaboração dos

gráficos da citada figura são apresentados no Anexo A, com dados do IBGE (2000, 2010). Do mesmo anexo, destacam-se as seguintes informações:

- Em 2000 o estado com menor porcentagem de domicílios com acesso à eletricidade era o Piauí, 75,95%. Já em 2010 o estado com menor índice de eletrificação passa a ser Roraima, apresentando 92,17% de domicílios com eletricidade (Piauí atingiu 93,10% de Universalização em 2010).
- No Brasil inteiro em 2000, 94,54% dos domicílios tinham acesso à energia elétrica, em 2010 esse valor subiu para 98,73%.
- A parte restante de 1,27% em 2010 significa 728.512 domicílios sem acesso à energia elétrica – justificando as prorrogações do programa.
- Dividindo por região, os dois censos mostram que a região mais carente de eletrificação é a região Norte (81,55% de domicílios com acesso à energia elétrica em 2000 e 93,68% em 2010). Nota-se a importância da expansão dos esforços para eletrificação nessa região.

O fato do programa Luz para Todos ter sido mais uma vez prorrogado, continuando vigente, indica que a universalização do acesso à eletricidade ainda não é uma realidade no Brasil. Assim, considerando que a tendência de universalização não mudou de 2010 até o presente, pela análise dos mapas e dados apresentados é possível notar que a região com maior dificuldade de universalização é a região Norte, justamente a região com maior potencial hidrelétrico.

Tanto nos processos de decisão do despacho das usinas térmicas e hidrelétricas - realizado pelo ONS - quanto nas decisões de diretrizes para expansão da matriz elétrica, é necessário considerar os recursos disponíveis. Como citado na seção 2.1, a matriz elétrica brasileira é essencialmente renovável e é de interesse nacional e mundial que essa característica seja mantida e mesmo acentuada. A avaliação das possibilidades técnicas deve ocorrer em alinhamento com as diretrizes ambientais e sociais em prol de uma sociedade com acesso aos avanços materiais da humanidade de maneira otimizada - com menor desigualdade e menores impactos ambientais. Portanto, o campo de estudo de energia deve abranger, cada vez mais, profissionais de diversos campos, em trabalho conjunto, com complementariedade de especialidades.

O contexto brasileiro é interessante por manter um sistema de dimensão continental para geração e transmissão de energia – o SIN – o que possibilita o proveito da variação

meteorológica ao longo do extenso território, além de não ter ainda atingido universalidade no acesso à eletricidade. Ao mesmo tempo, a geração centralizada, geralmente longe da demanda e a partir de usinas hidrelétricas de elevada potência instalada, encontra cada vez mais dificuldade de expansão, devido à crescente complexidade ambiental e social dos locais com potencial hidrelétrico remanescente. Essas características nacionais, atreladas a desenvolvimento tecnológico e mudança de paradigmas no setor elétrico, têm contribuído para expansão da geração distribuída no país, em concordância também com o cenário mundial, num contexto internacional de transição energética para aproveitamentos com cada vez menores emissões de gases de efeito estufa.

### **2.3. TRANSIÇÃO ENERGÉTICA**

O setor energético é complexo, envolve diversas áreas de conhecimento e está em constante transformação. As mudanças tecnológicas, também no contexto de energia, possibilitam e são possibilitadas por mudanças na sociedade. O homem já transitou por diversos tipos de aproveitamento energético e cada período da história humana, com seu respectivo uso de energia, representou um tipo de impacto no meio ambiente e na formação social. Atualmente, o aproveitamento energético é realizado principalmente a partir de fontes não renováveis, como apresentado na seção 2.1.1 Matriz Energética – página 7 do presente trabalho. Aproximadamente 81,2% da matriz energética mundial em 2018 foi composta pelas fontes gás natural, carvão e petróleo (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020b).

Esse tipo de aproveitamento energético, além de não renovável, representa um nível relevante de emissões de gases de efeito estufa (GEE). De acordo com a *Climate Analysis Indicators Tool* (CAIT - Ferramenta de Indicadores de Análise Climática em tradução livre), 78,05% de todas as emissões de GEE de responsabilidade humana (excluindo mudança no uso da terra) estão atreladas ao setor energético no dado mais recente disponibilizado, referente a 2016; sendo que, desde 1990, essa participação nunca foi menor do que 75,48% (em 1994), se mantendo relativamente estável (WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2019). As emissões de GEE, no entanto, apresentam crescimento ao longo dos anos, portanto as emissões relativas ao setor energético são crescentes ao longo dos anos.

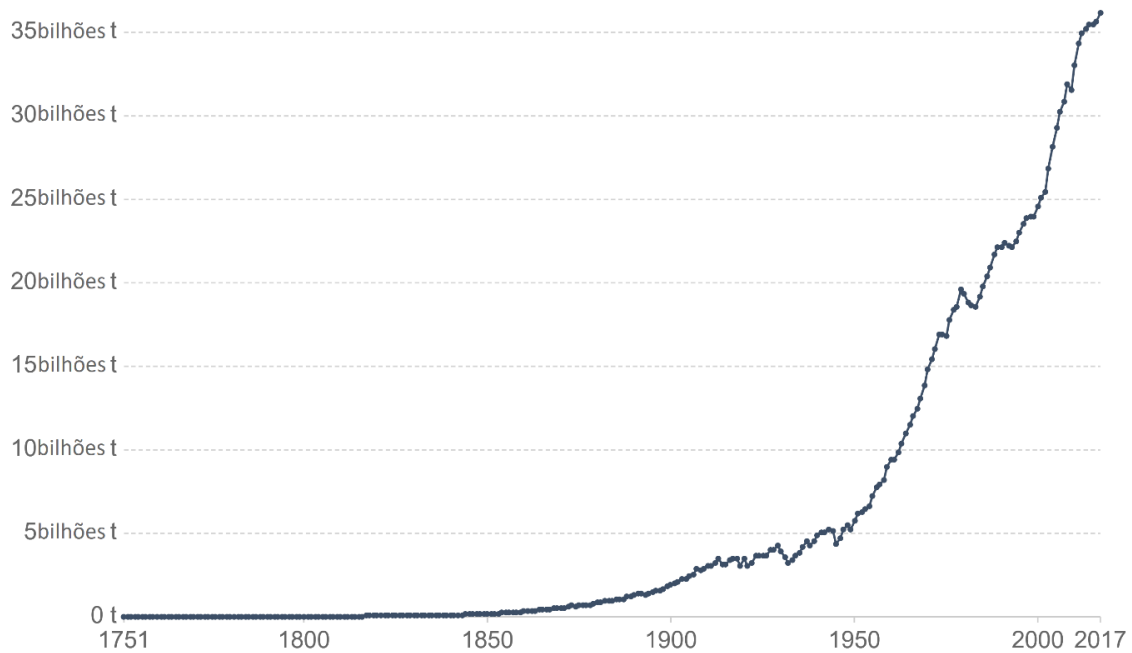
O gráfico apresentado na Figura 2.14(a) mostra a evolução das emissões anuais de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) entre 1751 e 2017, já o gráfico da Figura 2.14 (b) apresenta a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera entre 1751 e 2019, é possível observar o comportamento semelhante das duas curvas. A concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera em 2019 é a mais alta já ocorrida, considerando



os dados a partir de 800 mil anos Antes da Era Comum – antes de 1915 a concentração de CO<sub>2</sub> nunca tinha ultrapassado 300 ppm (GLOBAL RESOURCE INFORMATION DATABASE - GENEVA, 2020). Essas são algumas indicações da influência da ação humana sobre o clima.

### Emissões anuais de CO<sub>2</sub> pelo ser humano entre 1751 e 2017

Emissões de dióxido de carbono da queima de combustíveis fósseis no setor energético e na produção de cimento. Mudança do uso do solo não considerada.

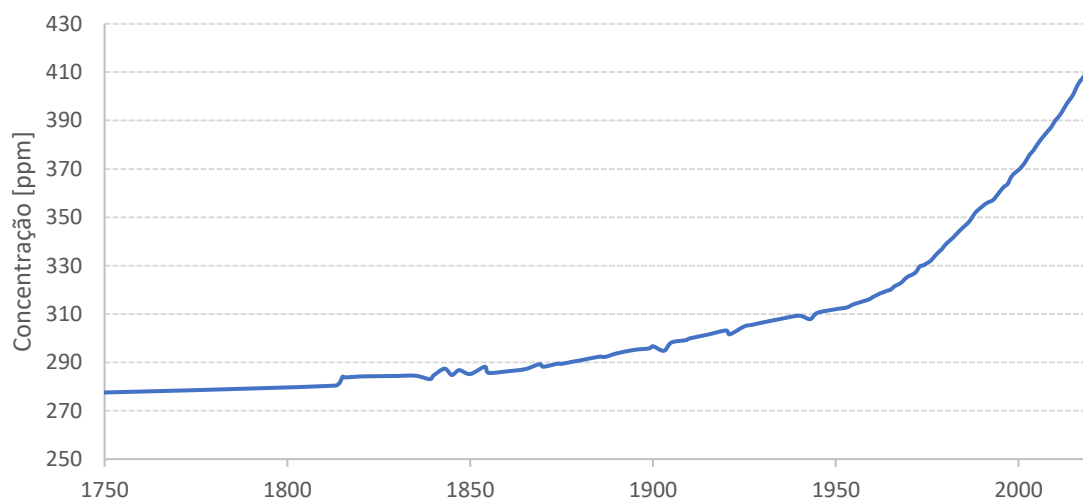


Source: Global Carbon Project; Carbon Dioxide Information Analysis Centre (CDIAC)

Note: CO<sub>2</sub> emissions are measured on a production basis, meaning they do not correct for emissions embedded in traded goods. OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions/ • CC BY

(a)

### Concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera por ano



(b)

Figura 2.14: Gráficos de (a) Emissões mundiais de CO<sub>2</sub> pela atividade humana por ano de 1751 a 2017 e (b) concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera por ano

Fontes: (a) *Our World in Data* (2020) adaptado. (b) elaborado a partir dos dados de *Global Resource Information Database – Geneva* (GRID-Geneva) (2020)

Os principais centros científicos do mundo definem a atividade humana como determinante no aquecimento global, que é um problema tratado hoje como consenso científico (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2013). Infere-se que o uso energético do ser humano atualmente não é sustentável, tanto porque os recursos primários utilizados são em sua maior parte finitos no planeta, considerando sua escala de tempo de renovação na natureza, quanto porque ele é responsável por elevados níveis de emissão de GEE, o que está relacionado às mudanças climáticas. Dessa maneira, fica justificada a atenção dada ao setor de energia quando se trata da busca de alternativas sustentáveis para a existência da sociedade humana.

Nesse contexto aparece o desafio de uma transição para um uso energético de menores impactos ambientais, sustentável. A sociedade humana já passou por transições energéticas anteriores, sendo a primeira grande transição energética a alteração do uso da biomassa para os combustíveis fósseis (SOLOMON, KRISHNA, 2011). O próprio uso dos hidrocarbonetos se alterou com o tempo, sendo que o carvão, predominante na revolução industrial, foi superado pelo uso de petróleo.

Schwab (2019) atrela novas tecnologias a mudanças nas fontes e usos da energia, ocasionando mudanças profundas na estrutura social. Dois exemplos são a) a revolução industrial (1760 – 1840) na qual o uso da máquina a vapor possibilitou a produção mecânica; b) a ampliação do uso da eletricidade e o conceito de linha de montagem, que proporcionaram a produção em massa, característica do século XX. Em lógica indutiva, as mudanças a partir da década de 1960, impulsionadas pelas tecnologias de computação, têm relação também com a possibilidade de transição para aproveitamentos energéticos sustentáveis e limpos.

Novos aproveitamentos energéticos tanto foram possibilitados pelas alterações da sociedade quanto a possibilitaram, numa dinâmica que consolidou a noção de progresso. Mas essas mudanças passam por um ambiente de disputa e

O novo nem sempre é desejado pela estrutura hegemônica da sociedade. Para esta, há o novo que convém e o que não convém. O novo pode ser recusado se traz uma ruptura que pode retirar a hegemonia das mãos de quem a detém. Por exemplo, quando se descobriu o petróleo, os proprietários do carvão resistiram a ele. (SANTOS, 2014, p. 107)

Não por acaso o célebre geógrafo cita como exemplo um caso relacionado à energia para abordar a questão de disputa para as mudanças que a sociedade vivenciou (e vivencia) ao longo da história. As fontes da energia e seu uso são parte determinante da complexa estrutura social humana, assim como as tecnologias envolvidas para os aproveitamentos energéticos. A atual

proposta de alterar a maneira como utilizamos energia da natureza em função de um aumento do bem-estar tem como propósito reduzir os impactos ambientais da atividade humana na Terra. Existem evidências de que essa nova transição no setor energético é urgente (BYRNE, LUND, 2017, PEÑUELAS, CARNICER, 2010) e é possível considerar que ela já está ocorrendo (LORENZO, 2016) em certos espaços – as mudanças estruturais na sociedade não ocorrem de maneira homogênea no espaço, como salienta Santos (2014).

A transição energética proposta contemporaneamente é, portanto, uma maneira de viabilizar à humanidade e de efetivar na sociedade um consumo de energia menos destrutivo ao planeta. Para tanto, tem como base a ampliação do uso de fontes renováveis e limpas de energia na matriz energética. Nesse contexto, e considerando as necessidades humanas em expansão, a eletricidade tem papel determinante.

A partir de 1960 a digitalização tem papel crescente e central tanto no modo de produção quanto na vida social cotidiana (SCHWAB, 2019). Existem muitos exemplos de expansão da necessidade de eletricidade vivenciados pela sociedade, alguns são o aumento da frota de carros elétricos, a urgência de se garantir acesso à rede elétrica para toda a população, a expansão de equipamentos eletroeletrônicos no cotidiano, a robotização da indústria. A perspectiva é que a parcela de consumo em energia elétrica cresça dos 19% do consumo energético total em 2019 para 35% já em 2050 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019b). Como se pode notar, a tendência de eletrificação tem um amplo alcance e as fontes utilizadas para geração de eletricidade têm cada vez maior importância ao planejamento energético – que geralmente tem abrangência nacional ou regional, mas envolve questões além das nacionais.

Tendo como diretriz a transição para sustentabilidade, acordos entre países para redução de emissões de gases de efeito estufa têm papel diplomático importante. Em 2015 foi realizada em Paris a 21ª Conferência das partes (COP21), integrando a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, do inglês, *United Nations Framework Convention on Climate Change*). Na COP21 foi firmado um acordo internacional como resposta global às mudanças climáticas aceleradas pelo homem, esse acordo, chamado Acordo de Paris é multilateral e busca considerar todos os países do mundo. O acordo tem como característica diplomática diferenciar as responsabilidades de países em desenvolvimento das responsabilidades de países desenvolvidos. Assim, visa considerar as necessidades e restrições específicas de países em desenvolvimento (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU, 2015a), para que a necessidade de crescimento econômico não fosse um impedimento a participar do acordo.

O acordo de Paris parte do consenso científico de que as mudanças climáticas são "uma ameaça urgente e potencialmente irreversível para as sociedades humanas e para o planeta" (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU, 2015b, p. 1). Por esse motivo, tomou-se como assertiva a necessidade de ampla cooperação entre países buscando profundas reduções nas emissões globais, visto que a preocupação tratada é comum a toda humanidade. As medidas a serem tomadas por cada país são diferentes, inclusive porque cada país é responsável por diferentes níveis de emissão de gases de efeito estufa e suas possibilidades são também diferentes.

Além das questões ambientais, que são cerne do acordo de Paris, é apontada ainda a "necessidade de promover o acesso universal à energia sustentável em países em desenvolvimento, particularmente na África, por meio da implantação reforçada das energias renováveis" (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU, 2015b, p. 2–3) para adoção do acordo. Focar nas necessidades sociais ainda não contempladas de parcela considerável da população mundial é essencial para lidar com a desigualdade, que também faz parte do setor energético de maneira incisiva.

Se uma transição energética faz cada vez mais parte da realidade, é verdade também que muitos desafios se apresentam. A hipótese de se atingir efetivamente uma transição energética não garante por si só uma maior igualdade ao acesso dos benefícios dos aproveitamentos energéticos avançados que a tecnologia contemporânea possibilita (JENKINS, MCCAULEY, *et al.*, 2016, 2017, JENKINS, SOVACOOOL, *et al.*, 2018). Por esse motivo, se faz necessário incluir uma discussão sobre as contradições da nossa sociedade no estudo do setor energético e, por extensão, do setor elétrico.

Outrossim, a transição energética per se não proporciona uma maior consciência e ação da população quanto à energia, ao planejamento energético nacional ou local, às decisões institucionais e às possibilidades tecnológicas e de desenvolvimento do setor. Para compreender esse contexto, foi cunhado outro termo, democracia energética. Democracia energética é um conceito que surgiu primeiro na prática, nas lutas sociais, para depois ser planejado na academia (VAN VEELLEN, VAN DER HORST, 2018). Em consideração concreta, a democracia energética inclui procurar e propor possibilidades institucionais e populares para que uma transição energética justa seja atingida a partir de diretrizes democráticas.

É possível pensar que o novo está sempre por emergir na realidade humana, considerada um momento de um processo que é construído socialmente pelo homem, ativamente, sob condições de disputa, sendo a história a mutação material da natureza humana (KONDER, 2008). Analisar a realidade do aproveitamento energético atual a partir dessas considerações

tem como propósito compreender fatos na totalidade e possibilidades para construção da nova realidade – a mudança é inevitável, mas qual mudança e como ela ocorrerá depende do empenho humano. As propostas que integram o contexto de transição energética podem, a partir da compreensão crítica da realidade, direcionar as mudanças estruturais da sociedade, por um processo menos predatório, para o benefício do bem-estar humano com maior igualdade.

### **2.3.1. Transição energética como meio para desenvolvimento**

O desenvolvimento nacional deve ser considerado no planejamento do setor energético. Deve ficar claro que essa preocupação inclui as questões econômicas, pois é a construção humana da economia como a conhecemos que tem selecionado as mudanças – sociais e mesmo técnicas – que a sociedade vivencia. Mas são as noções de igualdade de direitos e ampliação do bem-estar social que devem nortear o planejamento, como proposto pelo economista Amartya Sen (2010), que apresenta uma noção de desenvolvimento holística e não estritamente econômica. O autor aduz a importância de submeter o processo de desenvolvimento (inclusive econômico) ao bem-estar social, à expansão das liberdades humanas; essa expansão de liberdades passa então a ser considerada tanto a finalidade do desenvolvimento quanto o meio para atingi-lo (SEN, 2010, p. 55).

Dessa maneira, a noção de sustentabilidade não é adversária da economia e não deve ser vista dessa maneira. Pelo contrário, pode ser uma ferramenta para criação de novos mercados, expansão de indústrias, desenvolvimento de tecnologia. Segundo estudo da *International Renewable Energy Agency* (2020b), IRENA, as energias renováveis responderam por 11,5 milhões de empregos em 2019, com um crescimento de meio milhão de empregos em relação ao ano anterior.

De acordo com dados levantados para avaliação do Luz Para Todos – programa de eletrificação rural, iniciado em 2003 e vigente até hoje - o programa, ao levar eletricidade para locais antes não atendidos pela rede, gerou empregos, aumentou o consumo de eletrodomésticos, além de aumentar o bem-estar das populações abrangidas (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2009).

É também compreensível que países economicamente desenvolvidos invistam em pesquisa e planejamento para expansão de fontes limpas de energia, visando desenvolvimento de novas tecnologias e ampliação de mercados. Entre esses países estão inclusive os Estados Unidos, que historicamente são o país com maior valor cumulativo de emissões de GEE, respondendo por 25% das emissões de CO<sub>2</sub> sob responsabilidade humana de 1751 a 2017

(RITCHIE, 2019). De acordo com Ge e Friedrich (2020) os Estados Unidos foram também o segundo país mais emissor de GEE em 2016, responsável por 12,8% das emissões, atrás apenas da China (25,76%). Cita-se ainda que o país recentemente tem adotado postura controversa na diplomacia de recursos naturais, como a saída do Acordo de Paris utilizando como justificativa questões econômicas (POMPEO, 2019).

Ainda assim, os Estados Unidos incentivam o desenvolvimento técnico e institucional no campo de energias renováveis no país. Como exemplo de medida orientada a uma transição energética para sustentabilidade, no estado norte-americano de Virginia foi promulgado em abril de 2020 o *Virginia Clean Economy Act* (VCEA), que traça planos concretos e mensuráveis para a redução de emissões de gases de efeito estufa na geração de energia elétrica no estado, com objetivo de atingir cem por cento de energia elétrica de fontes sem emissão de gás carbônico até 2050 (VIRGINIA, 2020). O VCEA ainda é tema de propostas do governo estadual para geração de empregos locais, desenvolvimento tecnológico, criação de empregos com possibilidade de emprego remoto e engrenagem para retomada da economia, questões que Jennifer McClellan, senadora do estado, atrela<sup>1</sup> também às medidas para superar a crise econômica prevista devido à disseminação da doença Sars-Cov-2 no mundo (MCCLELLAN, 2020).

Relatório da IRENA também aponta o investimento em energias renováveis como alternativa para mitigar os problemas econômicos ligados à atual pandemia e promover um desenvolvimento com redução de desigualdades. As energias renováveis se mostraram mais resilientes no presente cenário do que as outras fontes de energia, apesar de todo o setor ter sido afetado pelas medidas sanitárias adotadas em 2020 (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2020a). As fontes renováveis podem ser consideradas, portanto, uma opção também aliada ao crescimento econômico.

Analisar as possibilidades existentes, assim como investir no desenvolvimento de novas tecnologias para ampliação dessas possibilidades, e expandir medidas sustentáveis são formas de movimentar a economia concomitantemente à manutenção de direitos sociais e à responsabilidade ambiental. Para tanto é essencial planejamento, avaliação a partir de dados mensuráveis das políticas públicas adotadas, adoção de diretrizes concretas e claras. Mudanças no consumo energético mundial fazem parte da história, é essencial, principalmente para países emergentes, como o Brasil, aproveitar as mudanças para desenvolvimento nacional no contexto

---

<sup>1</sup> A senadora ministrou uma palestra online em maio de 2020, ainda durante o isolamento devido à pandemia, apontando para as possibilidades de ampliação de mercados de energias renováveis inclusive como resposta à crise de empregos motivada pela pandemia de 2020.

globalizado. A criação e proveito de oportunidades relacionadas a novas tecnologias para uso de fontes renováveis e limpas de energia é uma das vertentes que pode tornar efetiva uma transição energética em auxílio ao desenvolvimento nacional.

Os desafios, considerando o campo de disputa social formado inclusive no setor energético, são também sinais de oportunidade de mudanças, que requerem empenho científico para que o movimento seja na direção de ampliação e manutenção da segurança energética, garantia de acessibilidade e menores impactos ambientais. A transição energética para uma estrutura menos nociva ao planeta e que garanta o bem-estar humano requer inovações e desenvolvimento tanto de questões técnicas – como redes inteligentes, tecnologias para aproveitamento energético novas e/ou mais eficientes – quanto de meios institucionais para promover a proliferação de forças disruptivas de mudança do setor energético. Um exemplo de grande importância que envolve o desenvolvimento técnico e institucional é a geração distribuída, tratada a seguir.

#### **2.4. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

A descarbonização é o atual mote da transição energética, com a finalidade de reduzir os impactos humanos no clima terrestre. Ao mesmo tempo, a digitalização está em expansão em todas as áreas da vida humana e é condição necessária para as mudanças dos setores energético e elétrico. E, por fim, a descentralização é uma tendência de desmonopolização da geração de eletricidade. Esses três Ds (Descarbonização, Digitalização e Descentralização)<sup>2</sup> são pilares complementares e interdependentes do futuro próximo também dos setores energético e elétrico (DI SILVESTRE, FAVUZZA, *et al.*, 2018). Portanto, abordar a questão da geração distribuída é imprescindível na consideração de fontes para geração de eletricidade.

A geração distribuída (GD) não possui uma definição universal; como apresentado por (DRIESEN, BELMANS, 2006), GD é abstratamente definida como uma geração de eletricidade de pequena escala, próxima da demanda, enquanto a geração centralizada é feita nas convencionais grandes usinas de elevada potência instalada. Cabe a cada Estado determinar a definição de GD para regulação de seu setor elétrico, podendo incluir limitação de potência instalada, obrigatoriedade de ligação na rede de distribuição, ou outra definição adequada à sua

---

<sup>2</sup> Os três Ds como guia para o futuro do setor energético é assunto corrente e não exclusivamente acadêmico, ver por exemplo as seguintes notícias em revistas sobre o setor de energia (KOENIG, 2017, RAJAKOVIC, 2020, REID, 2017)

geopolítica. A GD, complementar ao sistema centralizado convencional, reduz custos e impactos relacionados à transmissão de energia elétrica – o custo das perdas na rede básica em 2018, por exemplo, foi de R\$ 1,5 bilhão (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2019, p. 10). Outra vantagem da geração distribuída é a possibilidade de operação isolada em caso de interrupção do fornecimento da rede (sistemas preparados para esse tipo de operação podem utilizar baterias como segurança), aumentando a confiabilidade do sistema.

No Brasil, a primeira menção à GD foi feita na Lei 10.848 de 2004, mas a grande mudança de paradigmas veio com a Resolução Normativa (REN) da ANEEL número 482 de 2012. A REN ANEEL 482/2012 é a primeira que regula a geração distribuída para que o consumidor comum possa gerar energia localmente, sob sistema de compensação de energia (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2012a), se tornando agentes que, além de consumirem energia da rede de distribuição, também injetam energia nela – os chamados ‘prossumidores’ (neologismo criado a partir das palavras ‘produtor’ e ‘consumidor’) de energia. Fica a cargo do potencial “prossumidor” a iniciativa de instalação do sistema de geração e a análise das viabilidades técnica e econômica. No caso de consumidores ligados à baixa tensão, mesmo se a geração superar o consumo, é necessário o pagamento mensal do custo de disponibilidade à empresa distribuidora de energia.

O Quadro 2.1 reúne algumas das principais regras institucionais relacionadas à GD no Brasil, compondo um breve histórico da regulamentação da geração distribuída nacional.

Quadro 2.1: Sumário da legislação nacional associada à geração distribuída

<b>Identificação</b>	<b>Importância para a regulação da geração distribuída</b>	<b>Fonte</b>
Lei 10.848/2004	Institui a Geração Distribuída no país, define que as concessionárias, permissionárias e autorizadas de serviço público de distribuição de energia elétrica do SIN deverão garantir o atendimento à totalidade do mercado, inclusive GD.	(BRASIL, 2004b, seç. Art. 2, parágrafo 8)
Decreto 5.163/2004	Ao regulamentar a comercialização de energia elétrica, dá a primeira definição institucional de Geração Distribuída no país: "considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados (...) conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador". Esse decreto define ainda que empreendimentos hidrelétricos com capacidade instalada superior a 30MW e empreendimentos termelétricos, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a 75% (exceto para uso de biomassa ou resíduos de processo como combustível, cujo percentual de eficiência energética não é definido) não podem ser considerados como geração distribuída	(BRASIL, 2004a, parag. Art. 14)



<b>Identificação</b>	<b>Importância para a regulação da geração distribuída</b>	<b>Fonte</b>
REN ANEEL 167/2005	Regula a comercialização de energia proveniente de Geração Distribuída. Estabelece que o comércio de GD só pode ser feito entre o agente de distribuição (concessionárias, permissionárias e autorizadas de serviço público de distribuição de energia elétrica do SIN) responsável pela localidade em que o empreendimento de GD se encontra. Limita a proporção de GD que o agente de distribuição pode contratar em 10% da carga operada. O valor da energia pode ser repassado aos consumidores finais, respeitando limites da ANEEL.	(AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2005)
REN ANEEL 228/2006	Define requisitos para centrais geradoras termelétricas poderem ser classificadas como geração distribuída, de acordo com a eficiência da central.	(AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2006)
REN ANEEL 482/2012	Marco de mudança de paradigmas na geração distribuída nacional. Alterada pelas REN ANEEL 517/2012, REN ANEEL 687/2015 e REN ANEEL 786/2017. Regula a microgeração e a minigeração distribuídas. Estabelece o sistema de compensação de energia elétrica para o consumidor que escolher passar a ser produtor de energia em micro ou minigeração distribuída. Nesse modelo, a possível energia excedente produzida por esse agente é descontada de consumo futuro. A adesão ao sistema de compensação de energia só é possível no Ambiente de Contratação Regulada de energia, portanto não é válida para consumidores do Ambiente de Contratação Livre de energia elétrica.	(AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2012a)
REN ANEEL 517/2012	Estabelece a possibilidade de compensar a energia elétrica gerada em uma unidade consumidora em outra unidade consumidora, desde que ambas sejam do mesmo titular e dentro da área de um mesmo agente de distribuição (autoconsumo remoto) Limita a potência instalada para geração distribuída de acordo com a tensão do consumidor/gerador. .	(AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2012b)
Lei 13.169/2015	Reduz a zero as alíquotas de PIS/Pasep e COFINS “incidentes sobre a energia elétrica ativa fornecida pela distribuidora à unidade consumidora, na quantidade correspondente à soma da energia elétrica ativa injetada na rede de distribuição pela mesma unidade consumidora com os créditos de energia ativa originados na própria unidade consumidora no mesmo mês, em meses anteriores ou em outra unidade consumidora do mesmo titular, nos termos do Sistema de Compensação de Energia Elétrica para microgeração e minigeração distribuída, conforme regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL”	(BRASIL, 2015)
REN ANEEL 687/2015	Altera, na REN ANEEL 482/2012 a definição anterior para um prazo de 60 meses para compensação da energia excedente gerada. Altera a definição de Microgeração distribuída para potência instalada até 75 kW com utilização de fontes renováveis de energia ou cogeração qualificada pela ANEEL, com conexão na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.	(AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2015)

Identificação	Importância para a regulação da geração distribuída	Fonte
	Define dois novos tipos de empreendimentos para compensação da energia gerada: a geração compartilhada e múltiplas unidades consumidoras para um mesmo sistema de geração. Define o autoconsumo remoto.	
Portaria MME 538/2015	Cria o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica – ProGD, compreendendo a geração distribuída, a microgeração distribuída e a minigeração distribuída. Um dos propósitos da ProGD é ampliar o estudo de mecanismos para a comercialização de geração distribuída no Ambiente de Contratação Livre.	(MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2015)
REN ANEEL 786/2017	Altera, na REN ANEEL 482/2012, a definição de minigeração distribuída para central com potência instalada superior a 75 kW até 5 MW, a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada pela ANEEL, com conexão na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.	(AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2017)
Portaria MME 65/2018	Estabelece valores anuais de referência em sistemas de geração distribuída para as fontes renováveis e cogeração a gás natural, valores utilizados para regular o repasse dos custos de compra de energia pelos agentes de distribuição aos consumidores finais.	(MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2018)

Fonte: Elaboração própria, a partir das referidas fontes

O Quadro 2.1 apresenta algumas das principais normas que tratam da geração distribuída no Brasil, mas muitas outras normas influenciam direta ou indiretamente nesse mercado. Por exemplo, a REN ANEEL 77/2004 inicialmente tratava de procedimentos de redução tarifárias de uso dos sistemas elétricos de transmissão e distribuição para empreendimentos hidrelétricos até 1 MW e de outras fontes renováveis (solar, eólica, biomassa) e cogeração qualificada ambos até 30 MW. Mas essa norma foi alterada e a REN ANEEL 745/2016 aumentou a abrangência da norma para hidrelétricas até 50 MW e empreendimentos de fontes solar, eólica, biomassa, ou cogeração qualificada até 300 MW (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2004), alterando o foco da proposta de incentivo à geração distribuída para geração por fontes de baixas emissões de gases de efeito estufa. Assim, as normas têm papel de incentivar ou dificultar uma questão, como a geração distribuída, na sua área de atuação e estão em constante alteração para adequação às mudanças de realidade. Salienta-se que as novidades da geração distribuída ocorrem concomitantemente à expansão do mercado livre de energia em diversos países e é necessário ainda buscar mitigar as assimetrias de mercado existentes, para direcionar as mudanças a um sistema capaz de sanar as necessidades da sociedade de maneira ótima.

Inclusive pelas datas de instituição das normas de geração distribuída (ver Quadro 2.1), nota-se que a descentralização da geração elétrica é uma tendência recente no Brasil. A Figura 2.15, a seguir, apresenta a evolução da geração de energia elétrica a partir de geração distribuída desde 2015 até 2019. O BEN 2016 (ano base 2015) foi o primeiro em que EPE passou a fornecer

informações específicas da geração distribuída no país (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2016b).

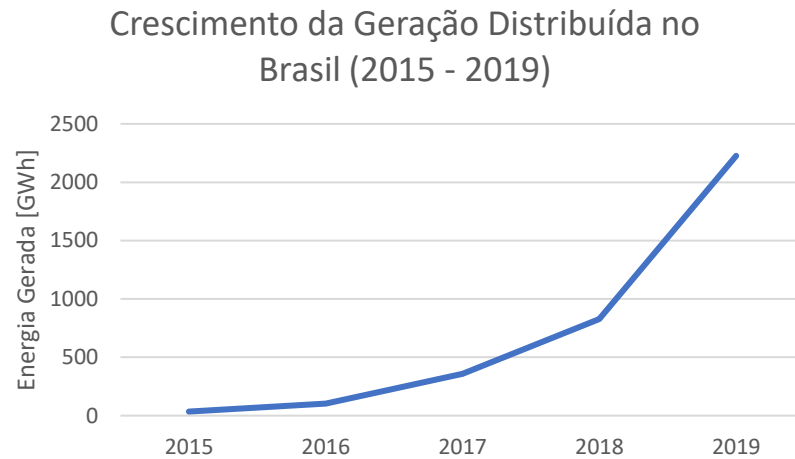


Figura 2.15: Energia gerada em geração distribuída por ano de 2015 a 2019

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do BEN de cada ano (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2016a, 2017, 2018a, 2019, 2020b)

Nesse contexto, a principal fonte para geração distribuída no Brasil tem sido a solar. Em junho de 2020 o país atingiu a marca de 3687,9 MW de potência instalada em GD com fonte solar – de um total de 3875,1 MW (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2020a). O crescimento em potência instalada por fonte é apresentado na Figura 2.16.

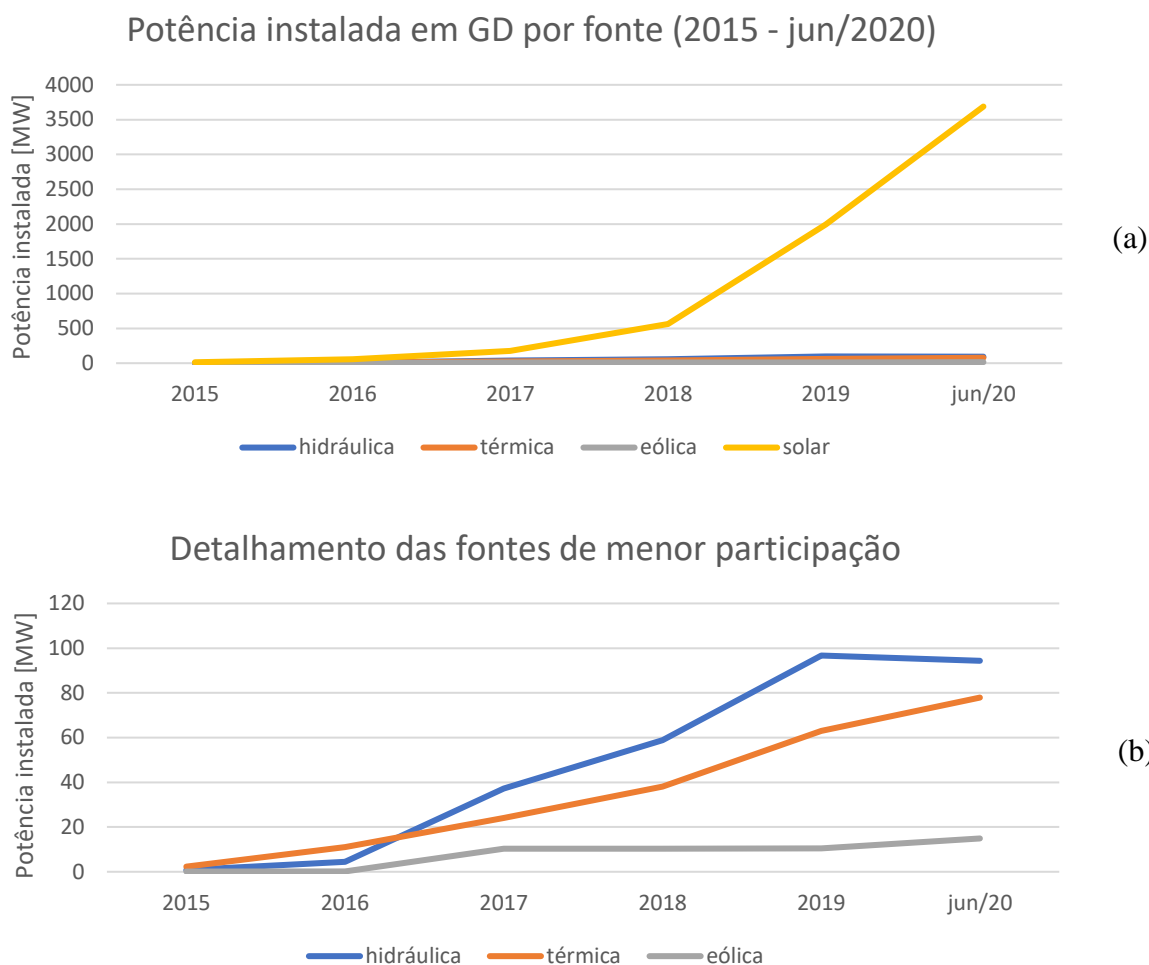


Figura 2.16: Potência instalada em geração distribuída no Brasil por ano de 2015 a junho de 2020. (a) todas as fontes consideradas (b) detalhamento excluindo a fonte solar com ajuste de escala

Fonte: Elaboração própria a partir de dados dos Balanços Energéticos anuais (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2020a, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2016a, 2017, 2018a, 2019, 2020b)

A partir da comparação entre (a) e (b) da Figura 2.16 é possível notar a imensa diferença de escala entre o aproveitamento de energia solar e outras fontes na geração distribuída brasileira. Em junho de 2020 existiam 94 aproveitamentos hídricos para geração distribuída em unidades consumidoras, para 303.976 instalações de aproveitamento da energia solar fotovoltaica no mesmo período (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2020a). A rápida expansão do mercado de energia solar fotovoltaica está atrelada a facilidades institucionais e desenvolvimento tecnológico com consequente redução nos preços para sua aplicação.

Considerando as informações do Quadro 2.1, o ambiente institucional nacional da geração distribuída tem evoluído, refletindo em um mercado crescente, exemplificado na Figura 2.15e na Figura 2.16. A geração distribuída atingiu 304,4 mil conexões em junho de 2020, das quais 99,9% são de placas solares fotovoltaicas (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA

ELÉTRICA - ANEEL, 2020a). Os aspectos institucionais precisam mesmo ter evolução constante, a partir da avaliação crítica das normas e políticas existentes e possibilidades existentes. O objetivo deve ser garantir que os interesses dos agentes do sistema elétrico estejam sendo atendidos de maneira ótima, ao mesmo tempo que as diretrizes nacionais para transição energética sejam consideradas. Assim, a concentração da geração distribuída apenas na fonte solar fotovoltaica aponta para a possibilidade de alterações na regulação para incentivo de outras fontes renováveis, desde que a alteração seja justificável.

Não cabe ao presente trabalho realizar comparação detalhada entre as fontes utilizadas para GD no Brasil, nem verificar as possíveis causas para as decisões tomadas até aqui. Porém, levando em conta a fonte hídrica, que é tema do presente trabalho, é interessante verificar que o aproveitamento efetivo da potência instalada é diferente entre as fontes. Os aproveitamentos hídricos em usinas hidrelétricas têm como características a alta flexibilidade operacional (por poderem ser despachadas para resposta imediata a flutuações na demanda), elevada confiabilidade (por não serem intermitentes como as fontes eólica e solar e utilizarem fonte interna ao país, os rios, que não sofre flutuações do mercado como o petróleo, por exemplo) e alto rendimento (devido às características de projeto das máquinas) em relação a outras fontes renováveis. Apresentam, então, maior relação de potência instalada e potência aproveitada em projetos convencionais. Um gráfico comparativo entre o aproveitamento efetivo das fontes solar e hídrica na GD brasileira entre 2015 e 2019 é apresentado na Figura 2.17.

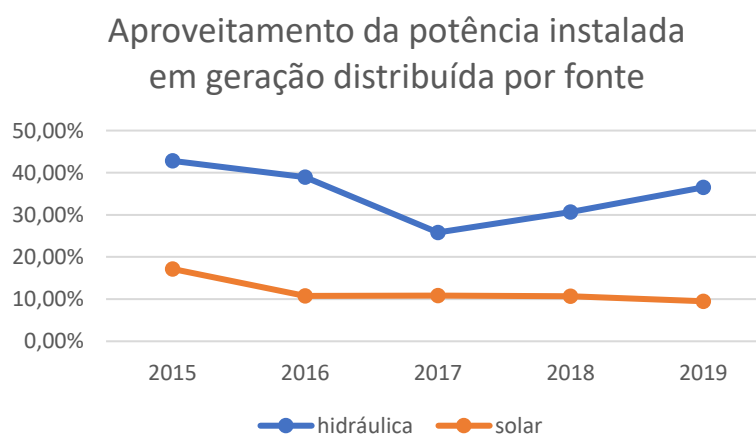


Figura 2.17: Relação entre energia gerada e energia relativa à potência instalada

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do BEN de cada ano (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2016a, 2017, 2018a, 2019, 2020b)

A diferença notável representada no gráfico da Figura 2.17 é esperada, visto que a fonte solar só apresenta geração em um período do dia, além de ser mais dependente de condições meteorológicas diárias.

A geração hidrocínética, de baixo impacto ambiental e social, pode ser uma alternativa para geração distribuída, principalmente em comunidades ribeirinhas em regiões remotas. Turbinas hidrocínéticas podem ser utilizadas em pequenos aproveitamentos e o desenvolvimento da tecnologia preconiza a redução de custos e a ampliação do campo de operação das turbinas, incentivando também os estudos de potencial hidrocínético para ampliar as instalações efetivas. A ampliação do uso de turbinas hidrocínéticas tende a reduzir os valores futuros de aproveitamento efetivo da energia hidráulica, curva apresentada na Figura 2.17, devido aos menores rendimentos e flexibilidade de turbinas hidrocínéticas em comparação com usinas hidrelétricas convencionais, mas a diferença atual entre a curva de energia hídrica e outras fontes apresenta margem para redução mantendo a hidráulica ainda como fonte de elevado aproveitamento da potência instalada. A geração distribuída com uma matriz variada é interessante ao sistema elétrico, com ampliação da participação de fontes renováveis, locais e ampliação da segurança energética.

Além das questões institucionais, desafios técnicos também existem para crescimento da GD tanto nacionalmente quanto no mundo. Os principais desafios técnicos estão ligados ao controle e proteção dos sistemas elétricos e esses desafios crescem à medida que o número de agentes geradores ligados a rede cresce (RAI, 2020). Com o crescimento do número de ligações de GD na rede de distribuição, os agentes de distribuição têm que lidar com novas variáveis para controle da qualidade da energia, pois existe influência na frequência e na tensão local na nova condição de trechos com fluxo de energia bidirecional – dependendo se no momento o agente está consumindo energia da rede ou fornecendo energia a ela (DRIESEN, BELMANS, 2006). O desenvolvimento tecnológico de equipamentos eletrônicos para mitigar essas questões se faz então necessário.

O desenvolvimento técnico-tecnológico deve estar sempre alinhado com as normas de regulação do setor elétrico. Dessa maneira, é possível pensar na otimização de um sistema cada vez mais limpo (com menos emissões de gases do efeito estufa), que atenda a demanda crescente de energia do mundo contemporâneo, a partir de um sistema com geração distribuída que oferece alta confiabilidade.

A geração distribuída altera substancialmente o mercado de eletricidade e, portanto, a estrutura desse setor. Utilizando a digitalização como meio rico para inovações e o objetivo de descarbonização do setor energético, o campo de possibilidades para ampliação do aproveitamento de novas fontes renováveis de energia é extenso. Ao se tratar de redução do poder dos monopólios de geração, a GD amplia a discussão sobre um setor energético mais

democrático, com maior participação direta dos consumidores nas tomadas de decisão, dentro das possibilidades institucionais.

## 2.5. APROVEITAMENTO DA ENERGIA HIDROCINÉTICA – QUESTÕES TÉCNICAS

Abordadas questões de contexto da possibilidade de estudo de turbinas hidrocinéticas para aproveitamentos energéticos, é necessário agora apresentar o contexto técnico da tecnologia, o que será feito brevemente nesta seção do trabalho.

### 2.5.1. Generalidades

Turbinas hidrocinéticas são um tipo de máquina, ou seja, aparelho no qual ocorre transformação de energia. É uma máquina motora, pois retira energia do escoamento e a transforma em potência de eixo, em oposição às máquinas geradoras, que fornecem energia ao escoamento, como é o caso de bombas. Para classificar as turbinas hidrocinéticas, é apresentada a Figura 2.18.

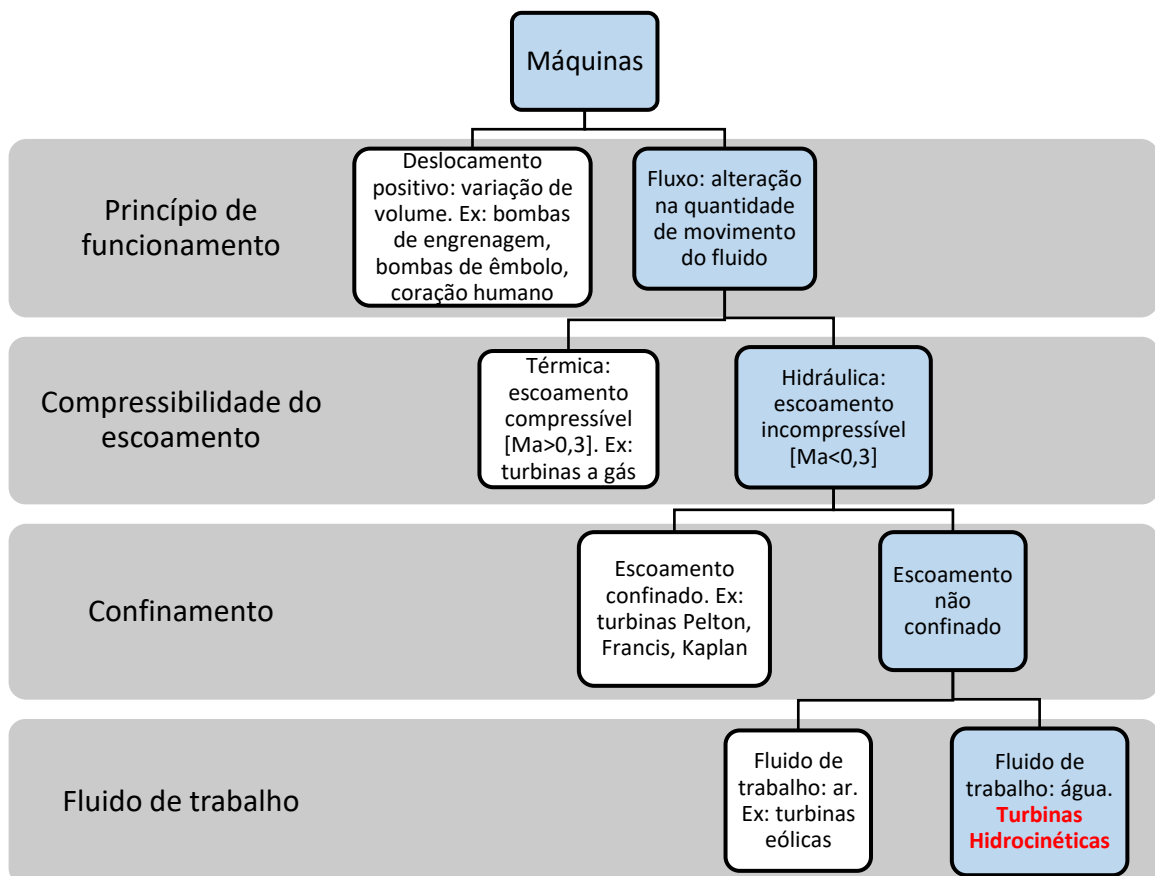


Figura 2.18: Classificação de máquinas com foco em turbinas hidrocinéticas  
Fonte: elaboração própria

Seguindo o esquema da Figura 2.18, turbinas hidrocínéticas operam com fluido de trabalho a água, em escoamento não confinado, com compressibilidade desprezível – ou seja, o Número de Mach ( $Ma$ ), que é calculado pela relação entre a velocidade do escoamento e a velocidade do som no fluido de trabalho, é menor do que aproximadamente 0,3 (WHITE, 2011) – e seu princípio de funcionamento é a alteração na quantidade de movimento do fluido (OLIVEIRA, Waldir, 2015).

É possível ainda classificar os rotores hidrocínéticos quanto à posição do eixo em relação ao escoamento, podendo ser de eixo vertical (eixo perpendicular à direção do escoamento), eixo horizontal (eixo paralelo à direção do escoamento) ou eixo inclinado. Existem ainda diferentes possibilidades para fixação e ancoragem da turbina. Existem três tipos principais de rotores de eixo vertical, seguindo a mesma concepção dos rotores de turbinas eólicas: Savonius, Darrieus, Darrieus-H (com sua variação do tipo gaiola de esquilo) e Gorlov. A Figura 2.19 mostra os diferentes posicionamentos de eixo em turbinas hidrocínéticas, diferentes ancoragens e os principais tipos de rotores.

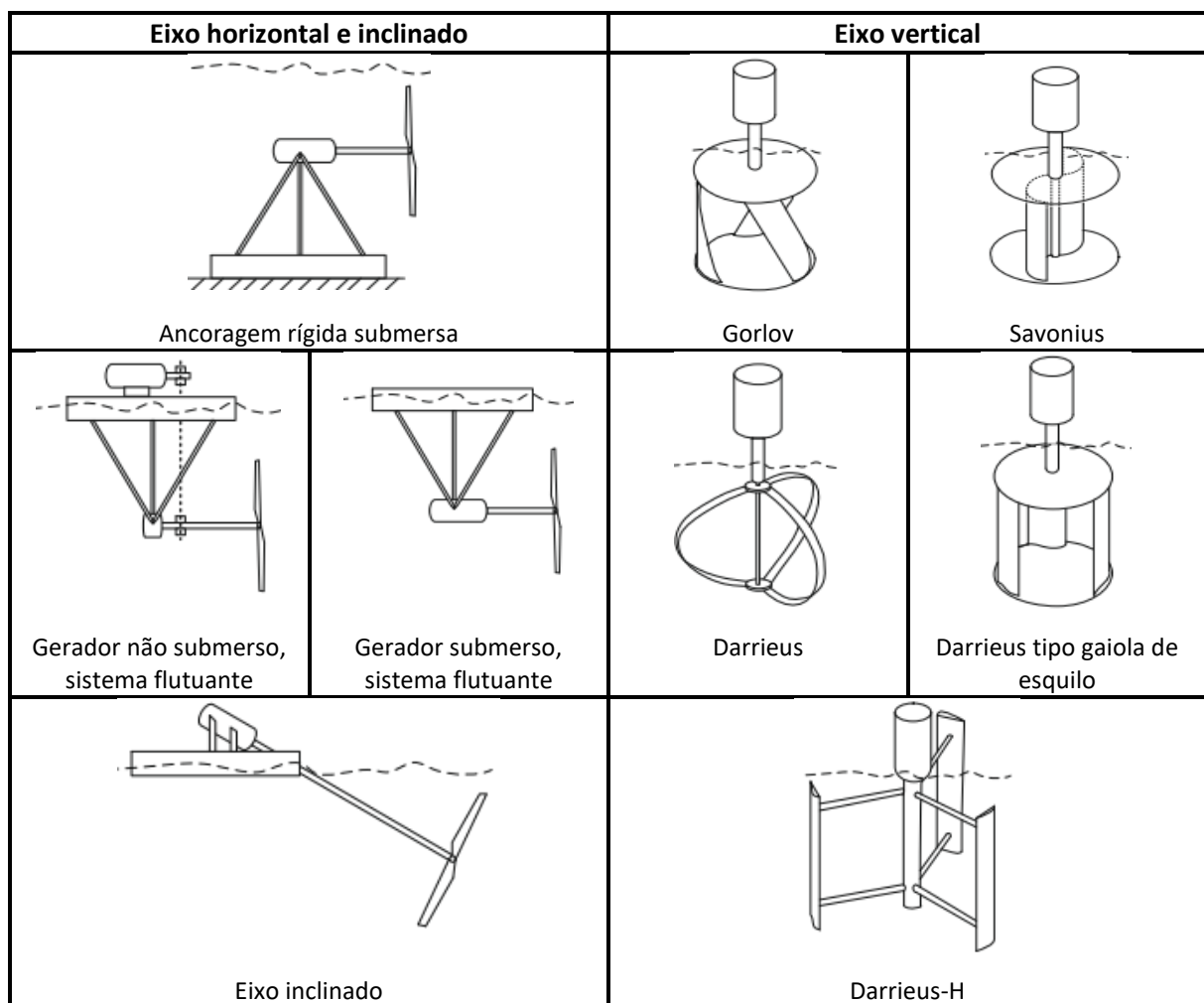


Figura 2.19: Principais tipos de turbinas hidrocínéticas

Fonte: Khan et al. (2009) adaptado



Com a intenção de aumentar o aproveitamento da energia disponível, é feito estudo de otimização do número e perfil das pás, do projeto da ogiva do rotor, da nacele onde é colocado o gerador (para caso de gerador submerso) e é possível ainda adicionar um duto em torno do rotor, direcionando o escoamento e geralmente funcionando como um difusor, com formato cônico.

Estudos numéricos e experimentais sobre rotores de eixo horizontal específicos com difusor são encontrados na literatura (GÓRALCZYK, ADAMKOWSKI, 2018, NUNES, MENDES, *et al.*, 2019, TAMPIER, TRONCOSO, *et al.*, 2017). A Figura 2.20 mostra a turbina de eixo horizontal estudada por Wang *et al.* (2019).

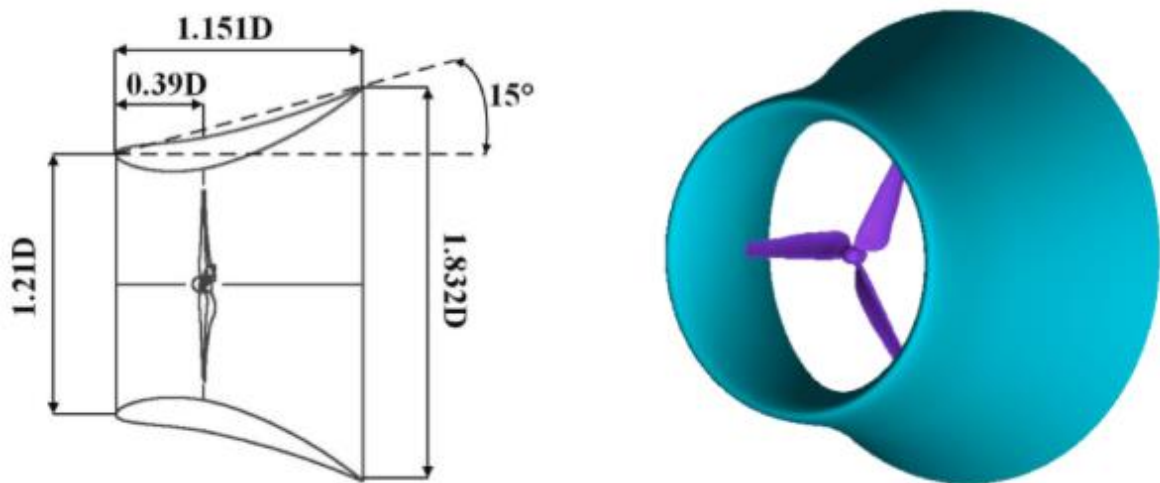


Figura 2.20: Exemplo de turbina hidrocínética de eixo horizontal com difusor (a) desenho em corte longitudinal (b) modelo 3D

Fonte: (WANG, Wen Quan, SONG, *et al.*, 2019)

A utilização de dutos em turbinas cinéticas não é exclusividade dos rotores de eixo horizontal, Elbatran, Ahmed e Shehata (2017) apresentam o estudo de um rotor hidrocínético do tipo Savonius (eixo vertical) com duto para direcionamento e melhor aproveitamento da potência disponível.

Turbinas hidrocínéticas são um tipo de máquina de fluxo que não opera energia potencial, assim, a transformação de energia dada na máquina é conforme apresentado na Figura 2.21.

$$E_c \rightarrow T$$

Figura 2.21: Tipo e direção da transformação de energia em turbinas hidrocínéticas

Sendo  $E_c$  a energia cinética do escoamento e  $T$  o trabalho mecânico.

A energia cinética do escoamento é, portanto, aproveitada a partir da mudança na quantidade de movimento do fluido, de acordo com o projeto da máquina (número e formato das pás, projeto da ogiva, etc) e com o escoamento. Uma das maneiras de classificar tanto as turbinas eólicas, quanto as hidrocinéticas é a força principal atuante para movimento da turbina. Existem as turbinas projetadas para aproveitamento principal da força de arrasto e aquelas projetadas para otimizar o aproveitamento da força de sustentação. A força de arrasto é paralela ao escoamento, enquanto a força de sustentação é perpendicular a ele.

Na Figura 2.22 é apresentado um perfil hidrodinâmico, ou hidrofólio, arbitrário, identificando as principais forças atuantes. Hidrofólios são especificados tanto para turbinas de eixo horizontal (por exemplo a turbina apresentada na Figura 2.20 na página anterior), quanto para turbinas de eixo vertical, como é o caso das turbinas Darrieus e Gorlov. Assim, essas turbinas têm como força motriz a força de sustentação, que promove a rotação da turbina.

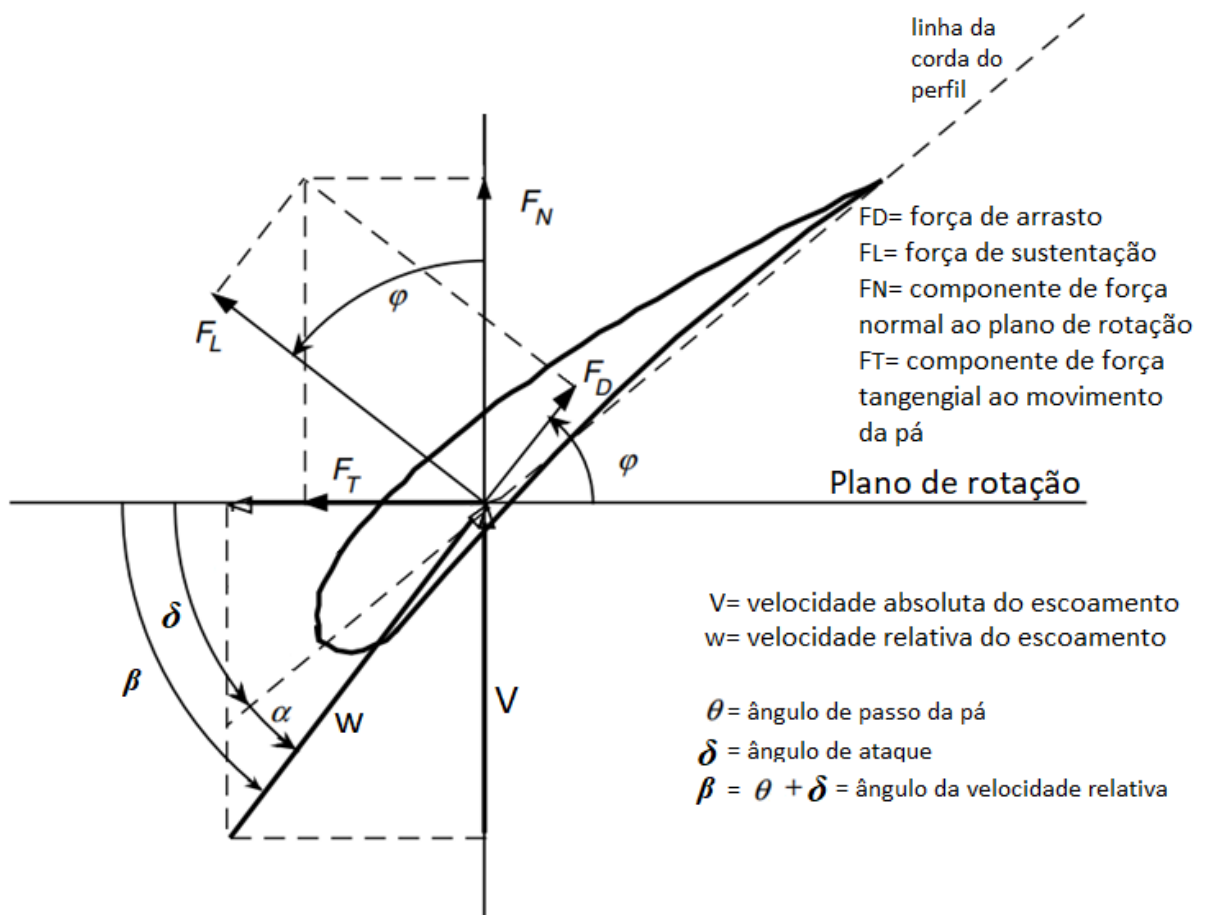


Figura 2.22: Hidrofólio de turbina hidrocinética com representação das velocidades, ângulos e forças  
Fonte: Manwell (2009, p. 120) adaptado.

Como exemplo de turbina que utiliza como força principal a força de arrasto, cita-se a turbina do tipo Savonius, de eixo vertical. A força de arrasto é função do coeficiente de arrasto,

que varia de acordo com a forma do corpo imerso no fluido, portanto o projeto de uma turbina do tipo Savonius considera que o coeficiente de arrasto do lado côncavo é diferente do coeficiente de arrasto do lado convexo, produzindo diferencial de forças e a consequente rotação da turbina (GOLECHA, ELDHO, *et al.*, 2011), como indicado na Figura 2.23, a seguir.

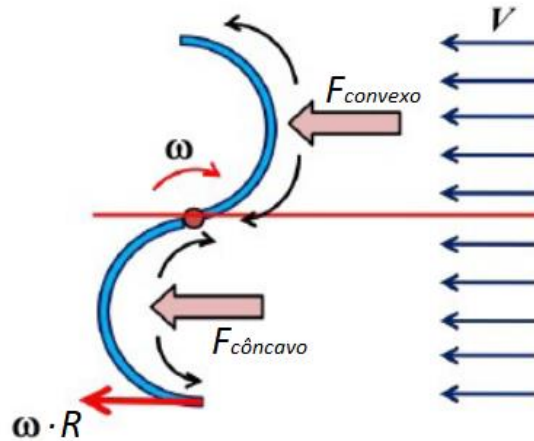


Figura 2.23: Forças e velocidades numa turbina Savonius  
Fonte: Wenehenubun *et al* (2015) adaptado.

Existem ainda turbinas híbridas, com mais de um tipo de rotor (por arrasto e por sustentação) num mesmo eixo ou perfis de pás desenhados para aproveitar os dois tipos de força. Essas turbinas têm o intuito de aproveitar a baixa velocidade de partida do rotor por força de arrasto e o melhor aproveitamento a velocidades mais altas do rotor por força de sustentação. Um exemplo desse tipo de turbina é o estudo apresentado por Pallotta *et al* (2020) para turbina eólica e Basumatary *et al.* (2021) apresentam um caso de turbina hidrocínética híbrida.

O objetivo de uma turbina hidrocínética, qualquer que seja sua concepção de projeto, é aproveitar de maneira ótima a energia disponível no escoamento, existindo limites teóricos, como é abordado a seguir.

### 2.5.2. Equacionamento básico

A energia cinética pode ser representada matematicamente pela equação (2.1),

$$E_c = m \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2.1)$$

Sendo  $m$  a massa e  $v$  a velocidade do vento antes da turbina (escoamento não perturbado).

Dada a definição de potência como energia por tempo, o cálculo da potência disponível num escoamento considerando apenas a sua energia cinética e uma área transversal ao escoamento,  $A$ , segue a equação (2.2).

$$P_{disp} = \rho \cdot A \cdot v \cdot \frac{v^2}{2} = \rho \cdot A \cdot \frac{v^3}{2} \quad (2.2)$$

Na qual  $\rho$  é a massa específica do fluido em escoamento.  $P_{disp}$  é a potência total disponível no escoamento, considerando essa área determinada. Para o aproveitamento efetivo, uma turbina é colocada no escoamento, com a interação entre fluido e estrutura da turbina, ocorre a mudança na quantidade de movimento do fluido e o rotor da turbina ganha velocidade angular,  $\omega$ . Assim, o aproveitamento da  $P_{disp}$  depende das características do escoamento e do projeto da máquina. Nesse contexto, define-se o Coeficiente de potência de uma turbina que opera em escoamento não confinado,  $Cp$ , como a relação entre a Potência de Eixo,  $P_e$ , e a  $P_{disp}$ , como mostra a equação

$$Cp = \frac{P_e}{P_{disp}} \quad (2.3)$$

A densidade de potência,  $Dp$ , é calculada pela equação (2.4)

$$Dp = \frac{P_e}{A} \quad (2.4)$$

A potência efetivamente aproveitada para geração de eletricidade depende ainda do rendimento mecânico ( $\eta_{mec}$ ) e elétrico ( $\eta_{el}$ ) – consideradas as perdas no multiplicador de velocidades, outras perdas por atrito, perdas no gerador elétrico. Assim, a potência gerada ( $P_{gerada}$ ) é dada pela equação

$$P_{gerada} = Cp \cdot \eta_{mec} \cdot \eta_{el} \cdot P_{disp} \quad (2.5)$$

Considerando que o escoamento ocorre de maneira não confinada, é possível calcular o limite teórico para o  $Cp$ , pois a velocidade do vento após o rotor nunca será nula, ou seja, nem toda a energia cinética pode ser aproveitada pelo rotor. Esse limite teórico é o rendimento ideal de uma turbina operando em escoamento não confinado e foi calculado pelo físico Albert Betz em 1920 ao estudar o limite de rendimento em moinhos de vento (WHITE, 2011, p. 805), ficando este conhecido como limite de Betz ou número de Betz. O limite de Betz – o  $Cp$  máximo teórico – é aproximadamente igual a 0,593. Ou seja, seja qual for o projeto da turbina para operar em escoamento não confinado, o rendimento nunca será superior a 59,3% da energia disponível na área ocupada. A dedução do número de Betz é apresentada no Apêndice I.

Outro parâmetro utilizado para projeto e avaliação de turbinas de escoamento livre é razão de velocidade de ponta da pá,  $\lambda$ , também chamada TSR (*do inglês Tip-Speed Ratio*). A definição da razão de velocidade de ponta da pá é dada pela equação (2.6), sendo R o raio do rotor e  $\omega$  a velocidade angular do rotor.

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega}{v} \quad (2.6)$$

O  $C_p$  tem forte dependência de  $\lambda$ , além de variar com o ângulo de passo da pá (CHICA, RUBIO-CLEMENTE, 2017). A Figura 2.24 mostra as curvas de  $C_p$  por  $\lambda$  com a variação do ângulo de passo,  $\theta$ , de uma turbina hidrocínética de eixo horizontal, com pás em perfil hidrofólio padronizado.

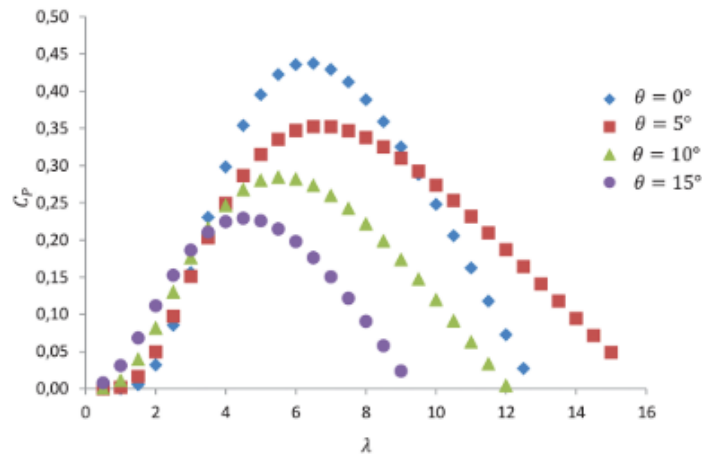


Figura 2.24: Exemplo de curvas de coeficiente de potência,  $C_p$ , por razão de velocidade de ponta da pá,  $\lambda$ , de uma turbina de eixo horizontal e três pás, com variação do ângulo de passo,  $\theta$ , da pá  
Fonte: (CHICA, RUBIO-CLEMENTE, 2017) adaptado

O gráfico de  $C_p$  por  $\lambda$  é amplamente utilizado para análise das turbinas de fluxo não confinado, determinando sua faixa de operação. Cada tipo de rotor tem uma função  $C_p$  por  $\lambda$ , a Figura 2.25 mostra um gráfico contendo curvas para alguns tipos de turbinas de fluxo não confinado e o limite ideal de Betz incluindo rotação na esteira da turbina (MANWELL, MCGOWAN, *et al.*, 2009).

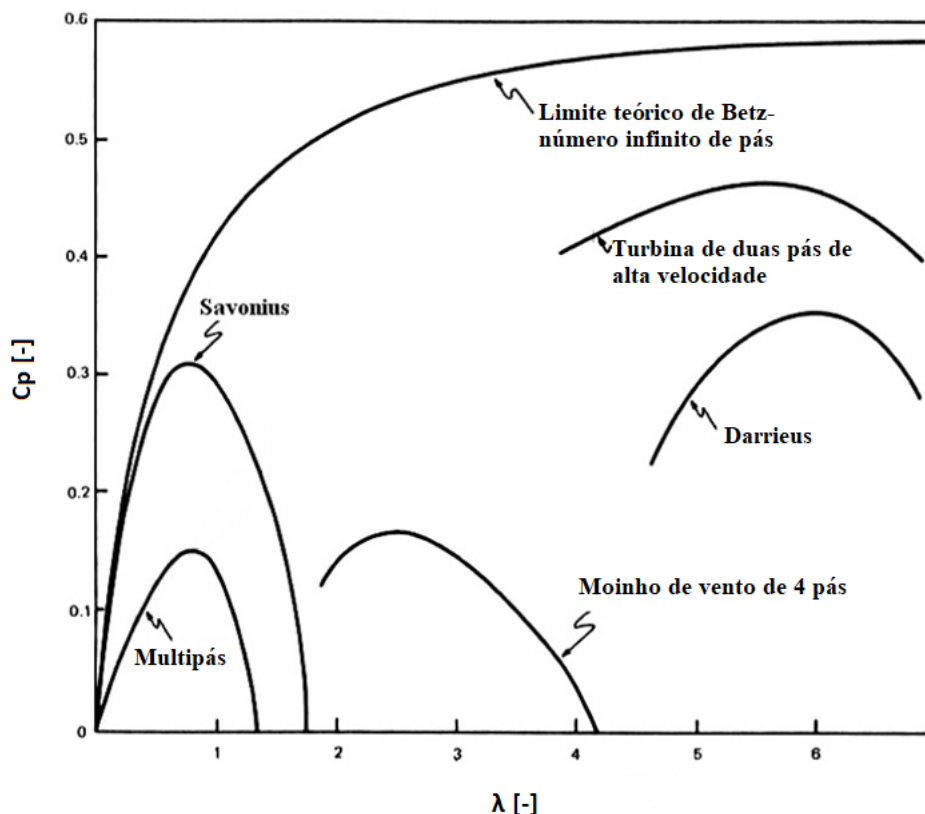


Figura 2.25: Coeficiente de potência por razão de velocidade da ponta da pá para diversos tipos de rotores de turbinas de fluxo livre  
 Fonte: (ELDRIDGE, 1975)

É importante notar que algumas versões da Figura 2.25 apresentam as curvas invertidas para as turbinas do tipo Savonius e do tipo Americana multipás (RAGHEB, RAGHEB, 2011). Para mais dados de turbinas Savonius em comparação com turbinas do tipo americana multipás, ver por exemplo Sule *et al.* (2019) e Roy e Bandyopadhyay (2019) para turbinas eólicas e Maldar *et al.* (2020) especificamente para turbinas hidrocínéticas, embora esse último apresente as curvas invertidas, os valores de  $C_p$  encontrados para turbinas Savonius se aproximam da curva aqui apresentada.

As equações e definições apresentadas nessa seção do trabalho são válidas para todas as turbinas que operam em escoamento não confinado, seja qual for o fluido operado, ou seja, são aplicáveis tanto para turbinas eólicas quanto para turbinas hidrocínéticas fluviais, oceânicas e estuarinas.

### 2.5.3. Aplicações de turbinas hidrocínéticas.

Como apontado na seção anterior, existem diversas maneiras de dividir as turbinas hidrocínéticas, uma delas é o tipo de aplicação, podendo ser: fluvial, oceânica em correntes marítimas ou utilizando a energia do movimento das marés, podendo ser aplicada em estuários,

essa última possibilidade concentra a maior parte das pesquisas contemporâneas no mundo (LAWS, EPPS, 2016).

De acordo com essa divisão, a turbina deve ser adequada para estar sujeita às condições ambientes de aplicação. Portanto, o projeto deve levar em conta as características locais. A seguir são apresentados alguns casos de aplicação existentes no Brasil e no mundo.

### 2.5.3.1. Aplicações no Brasil

O estudo de turbinas hidrocínéticas no Brasil começou na década de 1980, como uma alternativa para eletrificação isolada na Amazônia, as pesquisas foram coordenadas pelo Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA), mas não obtiveram sucesso de aplicação (ELS, BRASIL JUNIOR, 2015). Já na década de 1990, estudos promovidos pela Universidade de Brasília (UNB) culminaram na instalação de um sistema com turbina hidrocínética para geração de eletricidade na Bahia, com continuidade, atualização e expansão do sistema. Essa pesquisa foi expandida e outras turbinas foram instaladas pela equipe da UNB após os anos 2000, em Santa Catarina, Amapá, Amazonas e Mato Grosso (OLIVEIRA, Victor Augusto Freitas, 2015). A Figura 2.26 apresenta a evolução dos projetos de turbinas desenvolvidas na UNB.

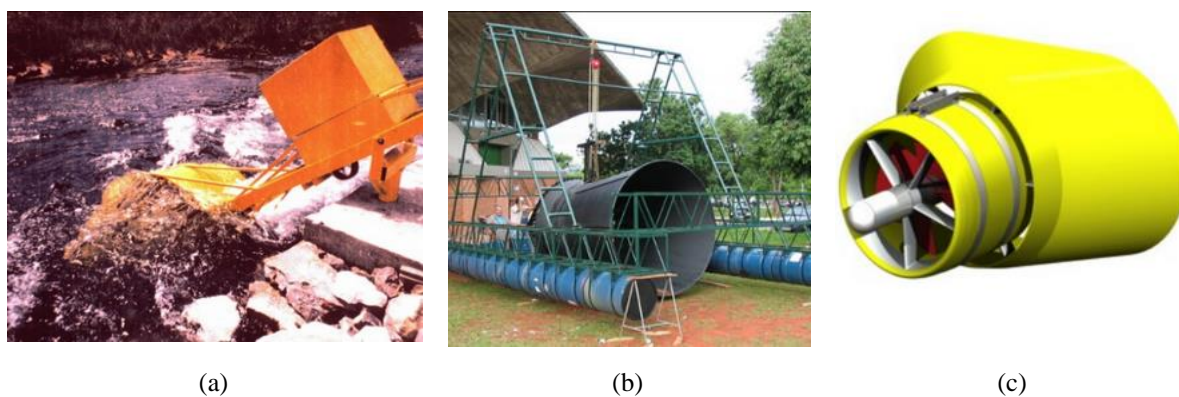


Figura 2.26: Turbinas hidrocínéticas desenvolvidas na UNB: (a) turbina para aplicação na região central do Brasil, (b) novo modelo, para aplicação em região amazônica, com difusor e (c) terceira geração de turbinas desenvolvidas na UNB

Fonte: (ELS, BRASIL JUNIOR, 2015)

Nota-se que o estudo de turbinas hidrocínéticas no Brasil é tradicionalmente atrelado ao benefício social e ambiental de sua aplicação em regiões com necessidades de eletrificação. Outras aplicações, todas de pequeno porte, foram elaboradas no país, sempre ligadas à pesquisa e sem aplicação comercial convencional (BOLAÑOS, 2015, p. 30–33).

Assim, as aplicações no Brasil até o presente momento são principalmente fluviais o que é justificável pelo elevado potencial hídrico, como abordado na seção 2.2.1 Potencial Hidrelétrico deste trabalho (página 16). As aplicações são também difusas e sem um direcionamento de políticas públicas específico – direcionamento que ocorreu, por exemplo, com as turbinas eólicas (LOZORNIO, MORO, *et al.*, 2017).

Pouco foi publicado até o momento sobre o potencial de geração hidrocínética, cita-se o estudo de Galdino et al (2018), a respeito da possibilidade de aproveitamento de correntes marinhas na costa brasileira para geração de eletricidade. Ainda com relação à possibilidade de utilização de turbinas hidrocínéticas para aproveitamento de correntes marinhas, algumas regiões costeiras de estados do norte e nordeste apresentam potencial de energia cinética maior do que  $0,5 \text{ kW/m}^3$  (atingindo até  $0,83 \text{ kW/m}^3$ ) em profundidades acima de 50 m, o que ocorre apenas em oito regiões do mundo, de acordo com modelagens realizadas em 2013 (VANZWIETEN, MCANALLY, *et al.*, 2015), apontando para a possibilidade de aplicação de turbinas hidrocínéticas.

A Figura 2.27 apresenta essas oito regiões. Em branco estão definidos os continentes e as regiões com profundidades oceânicas inferiores a 50 m, as áreas em cinza apresentam potencial menor do que  $0,5 \text{ kW/m}^3$  e os retângulos pretos identificam as áreas em que ocorrem potenciais superiores a  $0,5 \text{ kW/m}^3$ , em alguns pontos da costa da Oceania e Ásia no Oceano Pacífico, da América, inclusive da América do Sul no Oceano Atlântico e da África no Oceano Índico. O estudo de VanZwieten et al. (2015) é considerado conservador, os potenciais reais podem ser ainda maiores, sendo necessárias medições para levantamento de potencial.

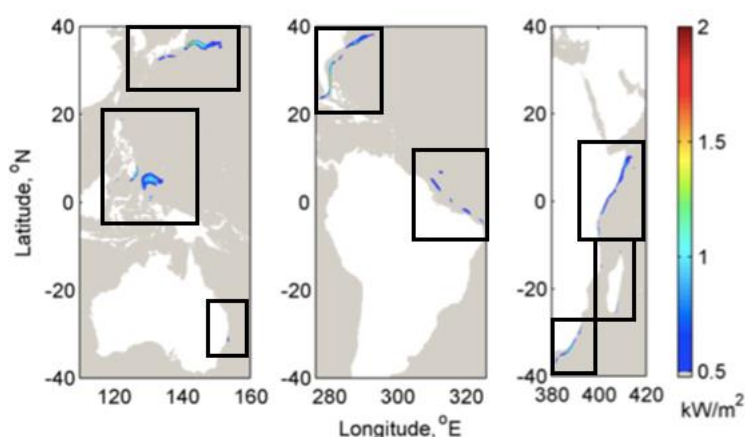


Figura 2.27: Identificação das regiões com potencial hidrocínético superior a  $0,5 \text{ kW/m}^3$  no mundo.  
Fonte: VanZwieten *et al.* (2015) adaptado

Para outro tipo específico de aproveitamento hidrocínético, Holanda *et al.* (2017) apresenta estudo da possibilidade de aplicação de turbinas hidrocínéticas no Rio Tocantins, à



jusante da Usina Hidrelétrica de Tucuruí. Esse tipo de aplicação considera o aproveitamento da energia remanescente após a passagem do escoamento pelas turbinas.

Em 2017 o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) para estudo de energias oceânicas e fluviais (INEOF – Instituto Nacional de Energias Oceânicas e Fluviais) iniciou suas atividades, com o intuito de promover o desenvolvimento técnico-científico das áreas de conhecimento envolvidas, inclusive no estudo de turbinas hidrocínéticas e suas potenciais aplicações. O instituto conta com o trabalho de pesquisadores de cinco universidades: Universidade Federal de Itajubá (Unifei), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Universidade Federal do Pará (UFPA), sob coordenação do Instituto de Energia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Até o momento, dois *workshops* presenciais foram promovidos pelo INEOF, sendo apresentados trabalhos de pesquisa relativos à energia hidrocínética e a áreas correlatas, cujos temas de estudo podem ser aproveitados, como o levantamento e modelagem de correntes oceânicas, de marés e fluviais, modelos de ancoragem para sistemas de aquisição de dados, entre outros (INEOF, 2018, 2019). Assim, é possível pensar na ampliação de estudos de turbinas hidrocínéticas no Brasil que promovam sinergia entre estudos fluviais e oceânicos, inclusive se beneficiando dos avanços em pesquisas de outras áreas que têm crescente interesse, como a eólica *offshore*.

#### 2.5.3.2. Aplicações no Mundo

No contexto mundial a tecnologia hidrocínética também se apresenta principalmente em fase de pesquisa e desenvolvimento, com algumas plantas piloto implantadas – o que aponta para a ampla possibilidade de se promover desenvolvimento tecnológico na área da aplicação de turbinas hidrocínéticas. No mundo existem casos de aplicações de turbinas hidrocínéticas para eletrificação de regiões isoladas, aplicações de pequeno porte em rios quanto aplicações e estudos a respeito de aproveitamentos de relativo grande porte (turbinas acima de 1MW), principalmente de aplicação oceânica, muitos ainda não implementados.

Niebuhr et al. (2019) apresentam um levantamento de aplicação de turbinas hidrocínéticas em rios e canais. O Quadro 2.2 apresenta informações retiradas do citado artigo, a turbina desenvolvida pela UNB foi também citada no artigo, mas aqui omitida por já ter sido abordada na seção anterior (página 45).

Quadro 2.2: informações de turbinas hidrocinéticas fluviais no mundo

<b>País</b>	<b>Potência instalada</b>	<b>Tipo de aplicação</b>	<b>Estado da aplicação</b>
África do Sul	3,9 kW	Canal artificial de irrigação	Design final do sistema a ser construído
Canadá	5 kW	Fluvial	Turbina retirada da operação em menos de um ano devido à formação de gelo no rio
Colômbia	1,1 kW	Fluvial	Em operação, energia utilizada em bombas de irrigação
Alemanha	2 kW	Fluvial	Em operação desde 2013
Estados Unidos	10,9 kW	Canal artificial	Realização de testes de protótipo a partir de 2013

Fonte: Niebuhr *et al.* (2019) adaptado

Um tipo específico de aplicação de turbinas hidrocinéticas é à jusante de usinas hidrelétricas convencionais para aproveitar a energia cinética remanescente no escoamento após passagem pelas turbinas ou após o vertedouro, como o citado estudo de Holanda *et al.* (2017) no Brasil. Liu e Packey (2014) apresentam uma revisão sobre as possibilidades desse tipo de aplicação no mundo, citando um estudo de aplicação no rio Columbia nos Estados Unidos.

Anyi e Kirke (2010) estudam a implementação de turbinas hidrocinéticas para eletrificação isolada, focando no principal problema na operação dos sistemas depois da implementação: o depósito de detritos na turbina, reduzindo sua vida útil e aumentando a necessidade de manutenção – o que é muitas vezes difícil em locais isolados. O estudo aponta alternativas para mitigar o problema e cita aplicações no Brasil, na Austrália e no Reino Unido. O estudo de Vermaak *et al.* (2014) apresenta uma revisão sobre a aplicação de turbinas hidrocinéticas em zonas rurais, com o uso de turbinas de pequeno porte. Miller *et al.* (2011) apresentam as possibilidades de uso de turbinas hidrocinéticas, citando um tipo específico de rotor e sua modelagem numérica, para eletrificação de regiões rurais de Gana.

Guodong *et al.* (2013) estudam as possibilidades de desenvolvimento de tecnologias oceânicas para geração de energia, inclusive turbinas hidrocinéticas, na China, sugerindo medidas institucionais para o incentivo das pesquisas tecnológicas dessa área no país. Já Deng *et al.* (2020) apresentam um estudo para implementação de turbinas hidrocinéticas oceânicas de larga escala na China, incluindo inclusive resultados de medições de velocidade de escoamento em locais passíveis de instalação de turbinas e modelagens numéricas desses fluxos.

As duas nações com mais pesquisas em energia hidrocinética no mundo são Estados Unidos e Reino Unido (GÜNEY, KAYGUSUZ, 2010, YUCE, MURATOGLU, 2015). A

Figura 2.28 apresenta uma distribuição de projetos de turbinas hidrocinéticas no mundo em 2015.

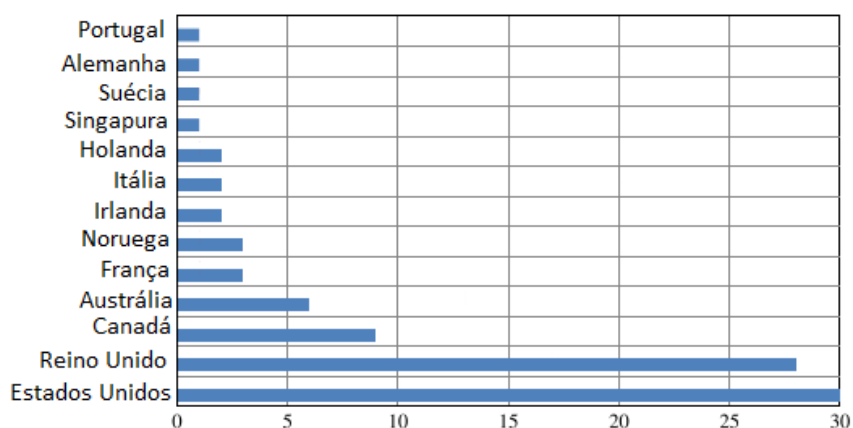


Figura 2.28: Distribuição de projetos de turbinas hidrocinéticas por país no mundo em 2015  
Fonte: Adaptado de Yuce e Muratoglu (2015)

Complementarmente, o estudo de Nachtane *et al.* (2020) inclui um levantamento de turbinas hidrocinéticas para aplicação em correntes marítimas, incluindo turbinas em fases iniciais de projeto e turbinas com, no mínimo, protótipos instalados no oceano. Esses dados são apresentados na Figura 2.29.

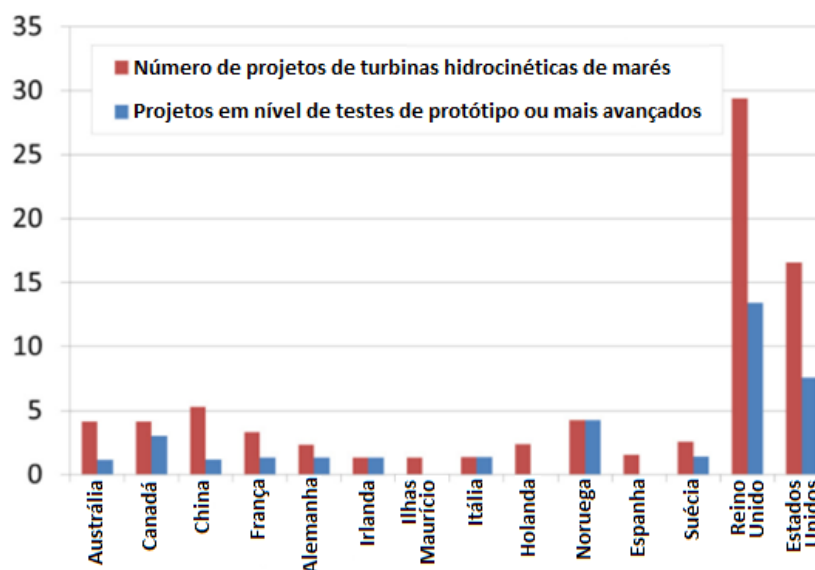


Figura 2.29: Distribuição de projetos de turbinas hidrocinéticas de correntes de marés por país em 2020  
Fonte: Adaptado de Nachtane *et al.* (2020)

É interessante notar que a China aparece na Figura 2.29, de dados mais atuais, e não na Figura 2.28. A partir de 2010, o governo chinês estabeleceu um fundo específico para financiamento de projetos de energias renováveis oceânicas no país, o *Special Funds for Marine Renewable Energy* (SFMRE), tendo já investido em mais de 107 projetos de diferentes

tecnologias de aproveitamento de energias oceânicas (inclusive turbinas hidrocínéticas) entre 2010 e 2017 (WANG *et al.*, 2018).

Harding e Bryden (2012) apresentam medições de velocidade de corrente marítima no Reino Unido, principalmente na costa norte, como passo em direção ao aproveitamento da energia hidrocínética. Iyer *et al.* (2013) mostram a situação da aplicação de turbinas hidrocínéticas de corrente de marés no Reino Unido até 2013, incluindo uma metodologia para o levantamento de locais potenciais para aplicação. Zeyringer *et al.* (2018) estudam a aplicação de tecnologias oceânicas, inclusive turbinas hidrocínéticas, numa consideração sistêmica, incluindo outras fontes renováveis como a energia solar e eólica no contexto do Reino Unido. Lamy e Azevedo (2018) apresentam uma comparação econômica entre a aplicação de turbinas hidrocínéticas e fazendas eólicas offshore no caso do Reino Unido. Esses são três exemplos de estudos de aplicação de turbinas hidrocínéticas no Reino Unido, considerando as características dos locais de maior potencial.

O *European Marine Energy Centre* (EMEC), com sede no Reino Unido, foi criado em 2003 para promover o desenvolvimento de energia oceânica (considerando marés, correntes e ondas). O centro realiza testes em modelos e aplicação de plantas piloto e é o centro com mais projetos em aplicação do mundo, contando com 13 plantas conectadas à rede (EMEC, 2020a). A Figura 2.30 apresenta três turbinas testadas no EMEC.

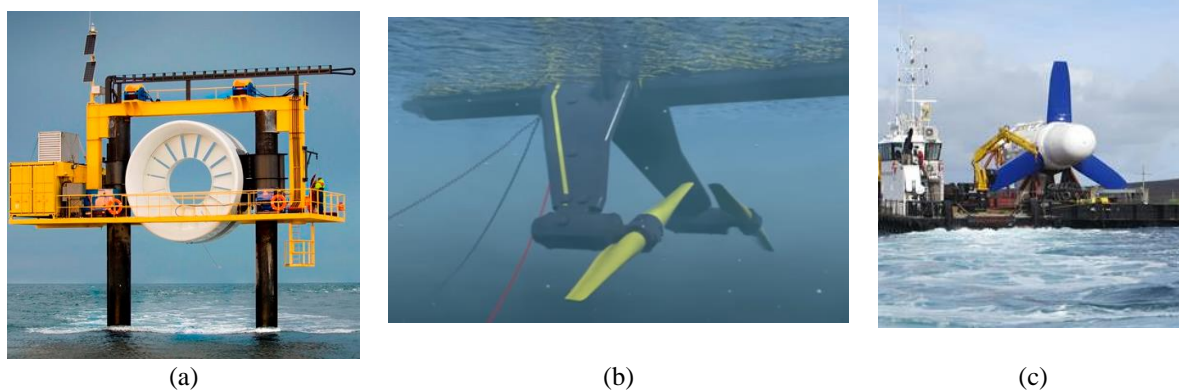


Figura 2.30: Exemplos de turbinas hidrocínéticas ensaiadas pelo EMEC (a) OpenHydro, modelo de turbina projetada para fornecer 2 MW de potência; (b) Modelo com conjunto de dois rotores em dispositivo flutuante, potência 2MW e (c) turbina Voith Hydro, 1MW, em transporte para o local de aplicação dos testes em campo  
Fonte: (EMEC, 2020b)

A maior usina de geração hidrocínética do mundo é de exploração de correntes de marés. A MeyGen fica localizada na costa norte do Reino Unido, tem atualmente 4 unidades geradoras com 1,5 MW de potência instalada cada, com previsão de adição de mais turbinas, sendo a única aplicação de múltiplas turbinas atualmente no mundo (SIMEC ATLANTIS ENERGY, 2020). Está planejada expansão da usina dos atuais 6 MW para 86 MW de potência instalada, sendo a planta atual utilizada para provar a viabilidade econômica e técnica da aplicação. As

turbinas atualmente instaladas são de eixo horizontal e três pás, mas na usina existem duas tecnologias distintas para o projeto dos rotores, uma com fabricação da Andritz e outra da Atlantis. Ambas foram ensaiadas no EMEC (EMEC, 2020d).

Outras turbinas hidrocínéticas em desenvolvimento, principalmente de aplicação oceânica, são apresentadas com figuras ilustrativas e fotos em artigos de revisão como os de Khan *et al.* (2009), Lago *et al.* (2010), Nachtane *et al.* (2020) e Laws e Epps (2016) A variabilidade de aplicações também chama a atenção, pois turbinas sem queda são utilizadas e pesquisadas no mundo para aproveitamento fluvial e oceânico (de correntes e de marés).

### **CAPÍTULO 3. CONSIDERAÇÕES SOBRE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS**

Como citado no capítulo anterior, as turbinas hidrocínéticas de grande porte no mundo estão, em sua maioria, em fase de desenvolvimento tecnológico e as aplicações de pequeno porte costumam prezar mais pela aplicabilidade e baixo custo do que por elevado rendimento, com algumas aplicações efetivas existentes. Assim, uma turbina hidrocínética de concepção simples pode resultar em baixo rendimento (baixo  $C_p$ ), mas ter ampla aplicabilidade se o contexto for favorável, por exemplo na eletrificação de pequenos vilarejos; já uma turbina de relativa alto rendimento, com projeto que otimiza o  $C_p$  em prejuízo do custo, tem outro escopo, como uma usina de relativa alta potência instalada para alimentar um sistema interligado.

É interessante desenvolver modelos de turbinas para aplicações de elevada potência instalada, possivelmente com diversos rotores numa mesma usina, prezando por otimização do projeto para maiores rendimentos. É também de interesse a pesquisa na área de turbinas de pequeno porte, para aplicações pontuais, principalmente para eletrificação de locais isolados, nesse caso prezando por facilidade de manutenção, durabilidade e baixo custo. Além disso, um conceito inicial de máquina proposto pode ser desenvolvido até seu uso final e também pode ser ramificado para outros conceitos e outras máquinas. O projeto de turbinas hidrocínéticas é, portanto, campo de amplas possibilidades de desenvolvimento tecnológico, o que é essencial inclusive para nações que buscam ampliar a industrialização, como é o caso de países em desenvolvimento, citando especificamente o Brasil.

Cabe, então, citar a noção Schumpeteriana de desenvolvimento econômico e sua dependência de mudanças tecnológicas:

Produzir significa combinar materiais e forças que estão ao nosso alcance. Produzir outras coisas, ou as mesmas coisas com método diferente, significa combinar diferentemente esses materiais e forças. Na medida em que as “novas combinações” podem, com o tempo, originar-se das antigas por ajuste contínuo mediante pequenas etapas (...) não [há] um fenômeno novo nem um desenvolvimento. (...) [Na medida] em que as novas combinações aparecerem descontinuamente, então surge o fenômeno que caracteriza o desenvolvimento. (SCHUMPETER, 1997, p. 76)

Para que o desenvolvimento econômico ocorra, Schumpeter (1997) salienta a necessidade de mudanças relativamente drásticas na produção, por meio de invenções e/ou inovações em produtos e processos produtivos. É evidente que cabe crítica a essa noção de desenvolvimento, já que simplifica a mudança tecnológica quase exclusivamente ao desejo de realização de agentes inovadores na economia, ainda que não acompanhe a proposição neoclássica de mudança tecnológica atrelada à decisão racional de maximização da produção e da eficiência

(DAGNINO, 2008). Ainda assim, as concepções de Schumpeter, amplamente influentes nas políticas públicas de países industrialmente desenvolvidos, podem ser interessantes a países em desenvolvimento (CALESTOUS, 2014).

Considerando o contexto atual, muito diferente do cenário de 1934, ano da primeira publicação do citado livro de Schumpeter, as rápidas mudanças proporcionadas pela digitalização alteram todos os setores e indústrias, inclusive o de geração de eletricidade – como abordado na seção 2.4, página 29 deste trabalho. É, portanto, necessário “pensar de forma estratégica sobre as forças de ruptura e inovação que moldam nosso futuro” (SCHWAB, 2019), para garantir um desenvolvimento centrado no bem comum num contexto de indústria caracterizado pela possibilidade de integração de descobertas em muitas áreas diferentes do conhecimento de maneira muito mais rápida e ampla do que em qualquer outra época da história.

Esse capítulo do trabalho busca apresentar conceitos que auxiliam em direcionar o desenvolvimento técnico de turbinas hidrocinéticas. Esse direcionamento visa esclarecer os riscos envolvidos nos projetos, assim como permitir uma visão prática das necessidades técnicas ao longo do desenvolvimento de uma nova tecnologia para aproveitamento da energia cinética de escoamentos fluviais ou oceânicos.

### **3.1. AVALIAÇÃO DE MATURIDADE TECNOLÓGICA DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS**

A criação de uma nova tecnologia, desde sua concepção inicial até a aplicação real, precisa ser considerada dentro das possibilidades técnicas e das restrições sociais, ambientais e econômicas. Considerando o contexto técnico, é interessante racionalizar o processo de desenvolvimento da tecnologia e uma maneira de fazer isso é avaliar a maturidade das turbinas a partir de um padrão geral, para classificar as turbinas de acordo com seu estágio de desenvolvimento. Esse tipo de avaliação auxilia na tomada de decisões para que tecnologias sejam efetivamente desenvolvidas até o estágio de maturidade completa e tenham aplicação prática.

#### **3.1.1. Níveis de Maturidade tecnológica**

O desenvolvimento de uma tecnologia, como qualquer projeto, envolve riscos. Risco pode ser definido como “um evento ou condição incerta que, se ocorrer, provocará um efeito positivo ou negativo em um ou mais objetivos do projeto tais como escopo, cronograma, custo

e qualidade” (PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, 2013). Assim, é essencial que o desenvolvimento de uma nova tecnologia siga um programa concebido para reduzir as incertezas, validar a nova tecnologia e adaptá-la ao contexto de aplicação.

Considerando essas necessidades para o desenvolvimento de novas tecnologias, a NASA passou a utilizar o conceito de *Technology Readiness Levels* (TRL, níveis de maturidade tecnológica, em tradução livre) a partir de meados da década de 1970 (MANKINS, 2009). Esse conceito, inicialmente aplicado para o desenvolvimento de tecnologias espaciais, divide o processo de desenvolvimento do produto a partir da classificação crescente da maturidade técnica da tecnologia em nove níveis. A Figura 3.1 apresenta os TRL e suas definições.

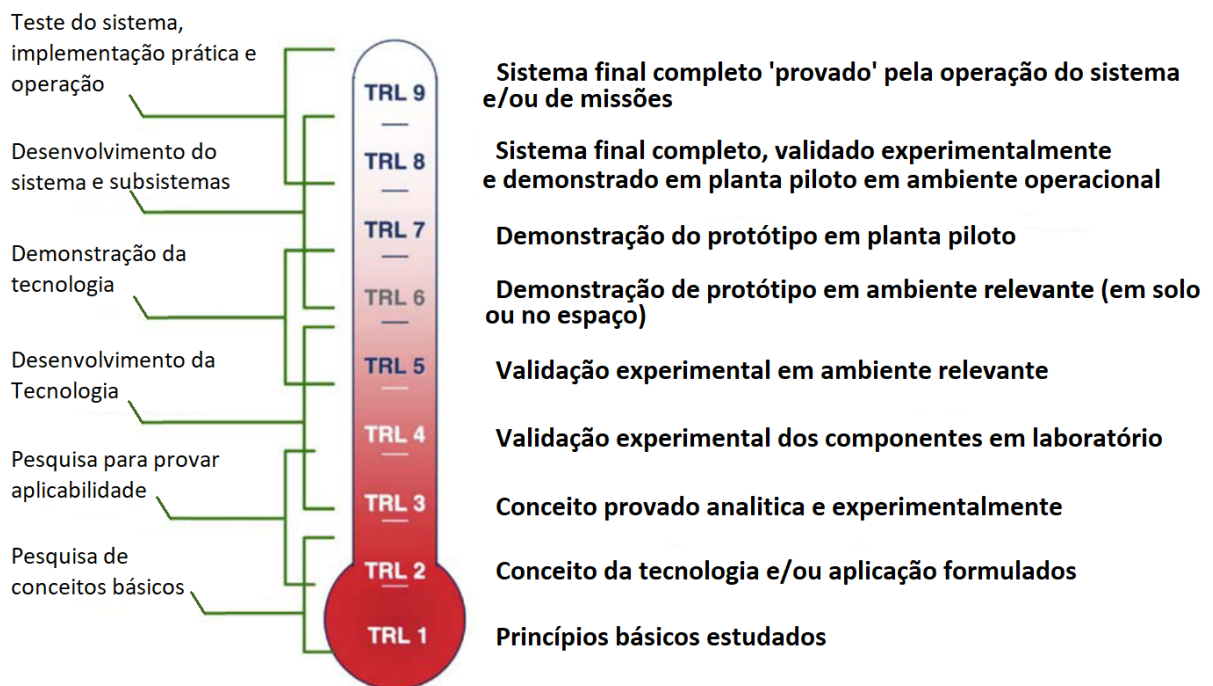


Figura 3.1: Níveis TRL definidos pela NASA  
Fonte: Tradução livre de Mankins (2009)

Considerando que o desenvolvimento de outras tecnologias, não relacionadas às aplicações originais da classificação por TRL, apresenta também riscos que devem ser mitigados, o uso dessa classificação passou a ser adaptado para diferentes áreas de desenvolvimento tecnológico. Sendo uma delas o desenvolvimento de máquinas para aproveitamento energético e geração de eletricidade.

O tempo em cada nível TRL e o custo envolvido com as pesquisas para avanço ao longo dos níveis variam drasticamente de acordo com a tecnologia ou aplicação em desenvolvimento (MANKINS, 2009). É necessário planejamento para que essas variáveis sejam consideradas no gerenciamento de cada projeto, a fim de justificar, racionalizar e priorizar os investimentos necessários ao desenvolvimento daquela tecnologia específica.



Atualmente, no contexto de energias renováveis, alguns agentes de Estado no mundo definem a classificação em termos de TRL para avaliação de projetos, de financiamentos, como maneira de promover o desenvolvimento tecnológico local. A seguir são apresentados três exemplos de diretrizes estatais da Austrália, da União Europeia e dos Estados Unidos; além de um exemplo de instituição que utiliza a classificação em TRL para o desenvolvimento de máquinas para aproveitamento da energia oceânica.

A *Australian Renewable Energy Agency* (2014), ARENA, Agência Australiana de Energias Renováveis em tradução livre, correlaciona os níveis TRL a uma classificação de maturidade comercial de tecnologias (*Commercial Readiness Index – CRI*). A agência governamental aponta esses conceitos como alternativas para identificação do estágio em que diferentes tecnologias se encontram, possibilitando comparação entre tecnologias que estão sendo desenvolvidas.

Na União Europeia o conceito de TRL é utilizado para aprovar financiamentos de pesquisas de inovação em energias renováveis. A Comissão Europeia desenvolveu um guia para avaliação das novas tecnologias utilizando os níveis TRL, como uma “estratégia para fazer a Europa mais atrativa a investimento em pesquisa, tecnologia, inovação e fabricação” (ROSE, BUNA, *et al.*, 2017, p. 10, tradução própria). Os autores apresentam ainda o uso do conceito de TRL como uma ferramenta em busca de alavancar resultados de projetos de Pesquisa & Desenvolvimento a soluções de mercado efetivas, o maior desafio encontrado na Europa hoje.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos também disponibiliza um guia para determinação do TRL de tecnologias em desenvolvimento do setor energético (não apenas renováveis), como parte da avaliação da maturidade de uma tecnologia, que é uma das medidas para análise de financiamento (UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2015).

Cita-se ainda que o EMEC, centro de pesquisa apresentado no capítulo anterior, utiliza uma escala para avaliação do desenvolvimento das tecnologias estudadas, baseada na escala TRL e dividida em cinco estágios principais (EMEC, 2020c). Sendo então um recurso já proposto para pesquisas da área de energias oceânicas, também para direcionar as práticas experimentais (NIELSEN, 2010).

Ainda que a avaliação da maturidade de novas tecnologias utilizando os conceitos de TRL seja crescente em diversas áreas, seu uso pode ser ineficaz caso a escala não seja criteriosamente definida para a área estudada (HÉDER, 2017). Assim, não se deve considerar apenas a escala definida pela NASA, mas avaliar as necessidades e o contexto da tecnologia específica que está sendo pesquisada. Nesse caso, a escala de TRL possibilita adequada avaliação da tecnologia, esclarecimento de riscos e definições de necessidades do projeto para que ele seja desenvolvido

até sua aplicação real. Essa racionalização pode auxiliar o financiamento e a priorização de projetos, com complementar definição de orçamentos e alocação de recursos. É um recurso especialmente interessante para países em desenvolvimento, com o intuito de reduzir a lacuna tecnológica em relação aos países atualmente desenvolvidos, promovendo progresso tecnológico nacional otimizado.

### **3.1.2. Adaptação dos TRL para turbinas hidrocínéticas**

Pondera-se que a divisão de níveis de maturidade tecnológica, considerando os conceitos de TRL, pode ser interessante também para o desenvolvimento de turbinas hidrocínéticas. Os principais desafios para a tecnologia hidrocínética atualmente são apresentados por Sood e Singal (2019) como: literatura insuficiente (o principal dos desafios), durabilidade da tecnologia, otimização de desempenho, estabilidade estrutural e confiabilidade, avaliação do impacto ambiental, custo da energia, caracterização espacial e temporal do escoamento. A racionalização do desenvolvimento da tecnologia utilizando níveis TRL organiza a busca por respostas às questões técnicas.

Wang *et al.* (2016) apresentam uma adaptação dos níveis TRL para aplicação em energias oceânicas, como ferramenta para gerenciamento de financiamentos do governo chinês para projetos de aproveitamentos dessas fontes – em continuidade ao projeto de levantamento de potencial energético *offshore* na costa chinesa. Os autores citam também cinco etapas gerais no desenvolvimento de tecnologias oceânicas de aproveitamento energético. Unindo e ponderando os conceitos apresentados por Wang *et al.* (2016) e por Nielsen (2010, p. 9), é possível dividir o desenvolvimento de tecnologias hidrocínéticas em cinco etapas gerais necessárias:

- i) pesquisa básica em novas tecnologias e conceitos e validação de conceitos;
- ii) desenvolvimento tecnológico focado em aplicações específicas, para um ou mais potenciais identificados – projeto da máquina;
- iii) desenvolvimento da tecnologia, otimização, validação de cada componente do sistema para as aplicações consideradas;
- iv) desenvolvimento do sistema integrado, estudos em escala e condição reais;
- v) operação do sistema por período estendido para validação, dados suficientes para avaliação tecno-econômica.

Considerando esses pontos essenciais e as características específicas do desenvolvimento tecnológico de turbinas hidrocínéticas, propõe-se a divisão dos níveis TRL para turbinas hidrocínéticas conforme apresentado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1: Adaptação dos TRL para turbinas hidrocínéticas

TRL	Descrição adaptada para turbinas hidrocínéticas	Ações para que se atinja o TRL
1	Conceito da máquina estabelecido, de acordo com princípios científicos estudados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definição da principal força de ação (sustentação ou arrasto);</li> <li>• Definição da posição do eixo;</li> <li>• Formulação do conceito geral do projeto;</li> <li>• Definição da complexidade de projeto das pás que será considerada para posterior otimização;</li> <li>• Definição do propósito do projeto – por exemplo otimização de rendimento, custo mínimo etc. (depende da aplicação).</li> </ul>
2	Conceito inicial da máquina desenvolvido para projeto da máquina	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolvimento de estudos analíticos para determinação inicial das faixas de operação;</li> <li>• Análise por elementos finitos, aplicação de fluidodinâmica computacional para validação inicial dos conceitos;</li> <li>• Simulações numéricas do comportamento estrutural da turbina;</li> <li>• Processos de otimização para o projeto;</li> <li>• Estudo estrutural do rotor;</li> <li>• Definição das principais características do escoamento para aplicação da turbina estudada (ex: velocidade de escoamento, níveis de turbulência);</li> <li>• Estudo e definição dos componentes necessários ao sistema.</li> </ul>
3	Estudos analíticos e testes em laboratório realizados para provar os conceitos considerados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Testes em laboratório do modelo em escala reduzida do rotor para validar os estudos prévios;</li> <li>• Otimização e adequação do projeto a partir dos resultados experimentais, caso necessárias;</li> <li>• Validação das simulações numéricas.</li> </ul>
4	Sistema completo considerado, cada componente validado para a aplicação planejada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Testes em laboratório para cada componente principal do sistema, como rotor, gerador, caixa de engrenagens.</li> </ul>
5	Componentes validados em ambiente de interesse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Levantamento do desempenho esperado para o sistema, considerando variáveis reais de aplicação, como características espaciais e temporais do escoamento e restrições locais;</li> <li>• Aplicação de leis de semelhança entre modelos reduzidos e protótipos.</li> <li>• Realização de estudos analíticos, numéricos e experimentais;</li> <li>• Estudos experimentais podem ser realizados com modelos em escala reduzida.</li> </ul>

TRL	Descrição adaptada para turbinas hidrocínéticas	Ações para que se atinja o TRL
6	Protótipo implementado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudos experimentais do sistema considerando protótipo (escala operacional);</li> <li>• Instrumentação adequada para controle e levantamento de dados de interesse na avaliação dos componentes e do sistema.</li> </ul>
7	Protótipo completamente validado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planta piloto instalada em local de interesse, com todos os componentes estudados;</li> <li>• Condução de testes experimentais em protótipos de tamanho real e ambiente de interesse, os dados são utilizados para demonstração da aplicação e possível proposição de melhorias.</li> </ul>
8	Sistema final implementado em situação real	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema final com todos os componentes instalados para operação convencional do sistema;</li> <li>• Testes finais no ambiente de interesse para demonstração em planta piloto.</li> </ul>
9	Sistema final completamente integrado em operação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operação da turbina já em nível comercial. Tempo de operação suficiente para validar a operação.</li> </ul>

Fonte: Autoria própria, baseado em Mankins (2004, 2009), Wang *et al.* (2016) e Nielsen (2010)

O Quadro 3.1 compõe uma diretriz básica geral, para aplicação no desenvolvimento de qualquer máquina de fluxo hidrocínética. É necessário que essa diretriz geral seja completamente definida para o desenvolvimento de cada turbina específica, com adição ou substituição das ações apresentadas de acordo com as necessidades verificadas ao longo da execução do projeto.

Runge *et al.* (2018) apresentam o detalhamento do desenvolvimento de uma turbina hidrocínética de eixo vertical específica; o trabalho apresenta as ações realizadas para que se atingisse cada TRL, até o TRL 7, nível em que a tecnologia se encontrava quando o artigo foi publicado. Aponta-se que as ações contam com necessidades específicas do projeto, sendo necessária revisão cíclica da linha de desenvolvimento do produto, para que a engenharia de produto seja otimizada.

É possível distribuir os níveis de maturidade tecnológica para turbinas hidrocínéticas apresentados no Quadro 3.1 nas cinco etapas de desenvolvimento de tecnologias oceânicas para aproveitamento energético definidas anteriormente, conforme apresentado na Figura 3.2, a seguir.



Figura 3.2: Níveis TRL adaptados para turbinas hidrocinéticas, distribuição em cinco etapas do desenvolvimento tecnológico

Fonte: Elaboração própria

Nota-se que atingir o TRL nove significa desenvolver tecnicamente a tecnologia a nível suficiente para sua validação de engenharia. Em paralelo ao avanço nos TRL e mesmo após atingido o TRL nove, questões econômicas, ambientais e sociais precisam ser estudadas para que seja possível e adequada a implementação efetiva da tecnologia com sua inserção e estabilização no contexto social.

### 3.1.3. Questões técnicas para progresso na escala TRL

Considerando os TRL específicos para turbinas hidrocinéticas proposto, é interessante pensar nos processos necessários para progresso de um nível TRL a outro. Esses processos envolvem recursos que podem ser otimizados, sendo necessário manter clara a concepção e o objetivo do projeto em todos os níveis de desenvolvimento.

O projeto de uma nova tecnologia envolve diversas áreas do conhecimento. Dentre as questões mecânicas que devem ser estudadas no projeto, citam-se: definição do número de pás, projeto da pá, solidez, relação de cubo, interação da turbina com o escoamento (incluindo efeitos viscosos, intensidade de turbulência, efeito de esteira, efeito de ondas para aplicação oceânica), definição do multiplicador a ser utilizado. Para as questões elétricas, apontam-se como exemplos: concepção do gerador, estratégia de controle, qualidade da energia na saída do sistema (KUMAR, SARKAR, 2016). Essas questões formam o conceito e o projeto da máquina e são discutidas a partir do TRL 1 até o TRL 4, podendo ser revisadas e detalhadas nos TRL seguintes.

Citam-se também exemplos de questões sobre o ambiente de aplicação: levantamento do perfil de velocidades de escoamento e sua variação no tempo, área disponível para aplicação da turbina, tipo de solo e possibilidades de ancoragem, densidade da água, nível de turbulência do escoamento livre em condição normal. As questões sobre o ambiente devem ser consideradas já no projeto da máquina (TRL 2) e são imprescindíveis a partir do TRL 5.

Outras questões envolvem avaliação econômica – custo de fabricação, capacidade da rede, incentivos estatais. Avaliação de impacto ambiental – efeito do sistema no meio (marinho ou fluvial), prospecção da redução de emissão de gases de efeito estufa com a implementação da tecnologia (análise do ciclo de vida). Avaliação do impacto social – benefícios sociais, geração de emprego, estabilização social da economia nos locais de implementação. Essas questões são de interesse para a aplicação efetiva, portanto podem ser necessários nos estudos dos TRL 8 e 9 e são essenciais para cada nova planta que se pretende implementar com a tecnologia já desenvolvida (TRL 9).

A partir do TRL 3 os testes experimentais são essenciais. Para esse fim, é necessário laboratório idôneo, no qual seja possível realizar os testes para validação do projeto dos componentes, pelo menos em escala reduzida (até o TRL 5). A partir do TRL 6, considera-se o projeto em nível de protótipo, portanto em escala de aplicação real; a partir desse TRL identifica-se a importância de adequada instrumentação para obtenção de dados utilizados na demonstração da viabilidade da turbina estudada. Adicionalmente, alcançar os TRL 7 e 8 depende da implementação de uma planta piloto, portanto já incluindo aplicação duradoura em local de interesse.

Durante todo o processo de desenvolvimento da nova turbina (TRL 1 a 9, mas principalmente para os TRL 2, 3 e 5), é possível se beneficiar do uso de softwares de simulação numérica para avaliação da engenharia desenvolvida. É plausível, por exemplo, a utilização de softwares para levantamento pelo menos prévio de regiões com elevado potencial hidrocínético.

No que se trata da máquina, dois tipos principais de estudos podem ser feitos, para estudo do comportamento da turbina em diferentes condições de escoamento, por análise de dinâmica dos fluidos computacional (CFD – do inglês, *Computational Fluid Dynamics*) e análise estrutural da máquina utilizando análise de elementos finitos (FEA – *finite element analysis*), por exemplo para análise de tensão e deformação ou vibração.

O uso de simulações para solução de problemas não é exclusivo da engenharia, a tecnologia e a digitalização são responsáveis por profundas alterações na vida humana recente. É necessário, porém, compreender o que se espera dos softwares, sendo possível, com seu uso adequado, reduzir tempo e custos de pesquisas que dependem de ensaios em modelos físicos, como é o caso do desenvolvimento de uma nova turbina hidrocínética.

### **3.2. BASE TEÓRICA E CONSIDERAÇÕES PARA SIMULAÇÕES NUMÉRICAS**

A capacidade computacional crescente implica em ampliação das possibilidades de solução numérica para problemas que envolvem princípios físicos descritos por equações de solução analítica inviável. Assim, uma aplicação é a Computational Fluid Dynamics (CFD, Dinâmica dos Fluidos Computacional, em tradução livre), para solucionar as equações de Navier-Stokes, que descrevem o processo de transferência de quantidade de movimento, calor e massa em escoamentos (ANSYS INC., 2013). A análise CFD é, portanto, utilizada em diversos campos de estudo, como estudo da ventilação de ambientes, modelagem de combustão, aerodinâmica de carros e aviões, transferência de calor em circuitos eletrônicos, dispersão de poluentes no ar, estudo do fluxo sanguíneo em veias. Dentre as aplicações entra também o desenvolvimento e otimização de máquinas de fluxo para aproveitamento energético, que é o caso estudado no presente trabalho.

As simulações numéricas podem ser verificadas pela comparação com outros estudos numéricos e devem ser validadas com a aquisição de dados reais obtidos em laboratório. Dessa maneira atesta-se a compatibilidade da modelagem com o estudo de um modelo físico real.

Na Unifei, a equipe do Laboratório de Hidromecânica Virtual (LHV) desenvolve diversas pesquisas que envolvem o estudo de escoamento e turbomáquinas. Assim, existe literatura interessante produzida por exemplo em teses de doutorado e dissertações de mestrado, cujas explicações de diferentes métodos utilizados para análise de CFD de turbinas específicas é detalhada (AZEVEDO, 2020, BOLAÑOS, 2015, BOTAN, 2014, 2019, REZEK, 2019, RODRIGUES, 2019).

Diferentes programas foram desenvolvidos para solucionar os problemas de CFD a partir de métodos numéricos adequados aos diversos estudos. Um deles é o CFX de propriedade do desenvolvedor ANSYS Inc, que foi utilizado no estudo do presente trabalho. O CFX utiliza o método dos volumes finitos para solução numérica das equações. Nessa técnica o domínio modelado é dividido em sub-regiões, chamadas volumes de controle, as equações são discretizadas para cada um desses volumes de controle e resolvidas por iteração, são obtidas então as soluções aproximadas para cada variável em diferentes pontos, consolidando o comportamento do escoamento ao longo do domínio (ACHARYA, 2016, ANSYS INC., 2013).

O CFX é utilizado no estudo de caso apresentado no CAPÍTULO 4, página 66. Ainda na base teórica aqui apresentada cabe a apresentação das equações que o software soluciona, de considerações sobre modelos de turbulência e malhas computacionais. Essas questões são essenciais na modelagem dos problemas, na busca por resultados numéricos condizentes com a realidade de modelos físicos.

### 3.2.1. Princípios fundamentais

É importante considerar os princípios físicos que descrevem o escoamento estudado e que podem ser descritos por equações matemáticas. O CFX soluciona as equações de Navier-Stokes para escoamento não estacionário, com volume de controle fixo no espaço – equações na forma conservativa (ANSYS INC., 2009, p. 18, PRASAD, 2020). Assim, equações de transporte devem ser consideradas, como a equação de conservação da massa (equação da continuidade) e de conservação da quantidade de movimento, como não existe geração de calor nesse tipo de problema, a equação da energia é desconsiderada para solução.

Considerando o presente caso de estudo de máquina de fluxo motora hidráulica, algumas simplificações são pertinentes. O escoamento é considerado incompressível, pois o número de Mach do problema é muito inferior a 0,3, portanto a massa específica é considerada constante. O escoamento relativo no rotor (domínio não-inercial) é considerado permanente, a velocidade relativa é constante no tempo para um dado ponto; assim como o escoamento absoluto no domínio inercial. A máquina é estacionária. A rotação é constante no tempo. Para o domínio não-inercial, é possível escrever as equações de conservação podem ser escritas na notação indicial como apresentado em (3.1) e (3.2), a seguir

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$



$$\rho w_k \frac{\partial w_j}{\partial x_k} + \rho(\vec{a}_c + \vec{a}_n) = -\frac{\partial}{\partial x_j}(p^* \delta_{ij}) + \mu \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial w_j}{\partial x_i} + \frac{\partial w_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.2)$$

Onde  $\delta_{ij}$ : delta de Kronecker,  $\rho$ : massa específica,  $w$ : velocidade relativa,  $p^*$ : pressão de movimento,  $\mu$ : viscosidade dinâmica,  $\vec{a}_c = 2\vec{\omega} \times \vec{w}$  aceleração de coriolis e  $\vec{a}_n = \vec{\omega} \times (\vec{w} \times \vec{r})$ , aceleração normal.

No domínio inercial as Equações (3.1) e (3.2) devem ser escritas em termos da velocidade absoluta e deve-se desconsiderar as forças aparentes provocadas pelas acelerações de coriolis e normal.

O sistema de equações apresentado não tem solução analítica conhecida para a maioria dos casos reais, portanto as soluções numéricas obtidas com auxílio computacional em softwares como o CFX – ANSYS são interessantes na engenharia de produto das turbinas. É possível, dessa maneira, determinar os campos de pressão e velocidades para diferentes casos.

### 3.2.2. Modelo de turbulência

A turbulência é um fenômeno complexo presente nas aplicações de máquinas de fluxo e efetivamente influenciam nos projetos de engenharia. Assim, para a solução numérica das equações envolvendo turbinas é necessário definir, dentre modelos de turbulência já estabelecidos, equações de transporte adicionais a serem resolvidas, para modelagem desse fenômeno e obtenção de resultados satisfatórios.

Existem diferentes abordagens para modelar a turbulência, um exemplo é a RANS (do inglês *Reynolds Averaged Navier-Stokes*), que se baseia na solução de médias no tempo para as equações de Navier-Stokes (KOLLGAARD VOIGT, 2000). Essa abordagem tem uma baixa demanda computacional em relação a outras abordagens e é amplamente utilizada, principalmente em problemas de engenharia nos quais as características médias da turbulência são suficientes para solução satisfatória. Outros exemplos de abordagens são a do tipo LES (do inglês *Large Eddy Simulation*), que tem ganhado espaço com o aumento da capacidade computacional disponível (CELIK, 2005), e a DNS, abordagem de maior custo computacional entre as citadas (AZEVEDO, 2020, p. 49).

Para que a modelagem retorne resultados de acordo com a realidade física de um problema real, é preciso ainda definir o modelo de turbulência que o programa considerará. Para o presente trabalho e estudo de caso foi considerada a abordagem por equações RANS e

modelo linear de viscosidade turbulenta chamado *Shear-Stress Transport* (SST) (ANSYS INC., 2009), com base em estudos numéricos de turbinas hidráulicas já validados experimentalmente (TIWARI, KUMAR, *et al.*, 2020).

O modelo SST é um modelo de duas equações, portanto ele inclui mais duas equações de transporte para solução numérica da turbulência. Esse modelo utiliza como base dois outros modelos de duas equações: o k- $\epsilon$  para regiões distante de paredes e o k- $\omega$  para regiões que envolvem camada limite e pode ser amplamente utilizado nos problemas de engenharia (MENTER, 1994, MENTER, KUNTZ, *et al.*, 2003).

Nos modelos k- $\epsilon$  e k- $\omega$ , uma das equações adicionadas é referente à energia cinética turbulenta, k, já a segunda é referente à taxa de dissipação da energia turbulenta,  $\epsilon$ , ou à taxa de dissipação específica (por unidade de energia cinética),  $\omega$  (GATSKI, RUMSEY, 2010). As definições das equações, resolvidas pelo software ANSYS CFX numericamente, podem ser encontradas no próprio guia teórico do programa (ANSYS INC., 2009) e explicações mais detalhadas podem ser encontradas nas referências citadas nessa seção do trabalho, assim como em Souza *et al.* (2011) e Távora (2011, p. 53–89).

### 3.2.3. Malha Computacional

Como supracitado, o CFX® utiliza método dos volumes finitos para solução das equações envolvidas. Assim, é preciso discretizar o domínio fluido estudado em pequenos volumes, essa discretização é a malha computacional, que pode ser formada por diferentes formatos, na Figura 3.3 são apresentados os formatos para estudos de três dimensões.

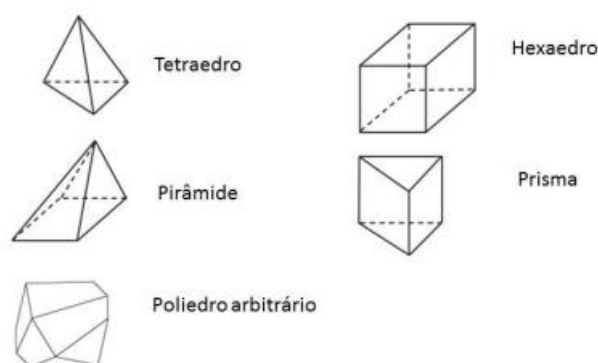


Figura 3.3: Formatos de células de malha utilizados em modelagens de CFD para estudos tridimensionais  
Fonte: Botan (2019, p. 60) adaptado.

Alguns estudos de engenharia podem ser estudados em modelagens em duas dimensões, reduzindo a demanda computacional, mas essa abordagem não é utilizada no estudo de caso deste trabalho. No presente estudo foi utilizada malha tetraédrica, para adequada adaptação à

geometria do rotor. A malha deve ser mais refinada (maior número de células) em regiões com maiores gradientes de pressão ou velocidade, como nas proximidades das paredes do rotor. É também possível utilizar a ferramenta ‘*inflation*’ do programa ICEM CFX®, que permite adicionar camadas prismáticas definidas pelo usuário com base em critérios da lei da parede, para empilhar um número definido pelo usuário de células próximas à parede para adequar a modelagem na camada limite.

Além disso, o domínio numérico deve abranger dimensão suficiente para contemplar a esteira (região perturbada do escoamento após o rotor), pois essa região é determinante para cálculo do rendimento do rotor. Um detalhamento da malha utilizada é apresentado na seção 4.2.1, página 73.

## CAPÍTULO 4. ESTUDO DE CASO

Dadas os conceitos atrelados ao desenvolvimento de turbinas hidrocínéticas, é proposto o estudo de um caso específico de rotor hidrocínético. As ações de desenvolvimento de produto realizadas anteriormente e as propostas do presente trabalho para o rotor estudado neste estudo de caso são apresentadas no fluxograma da Figura 4.1.

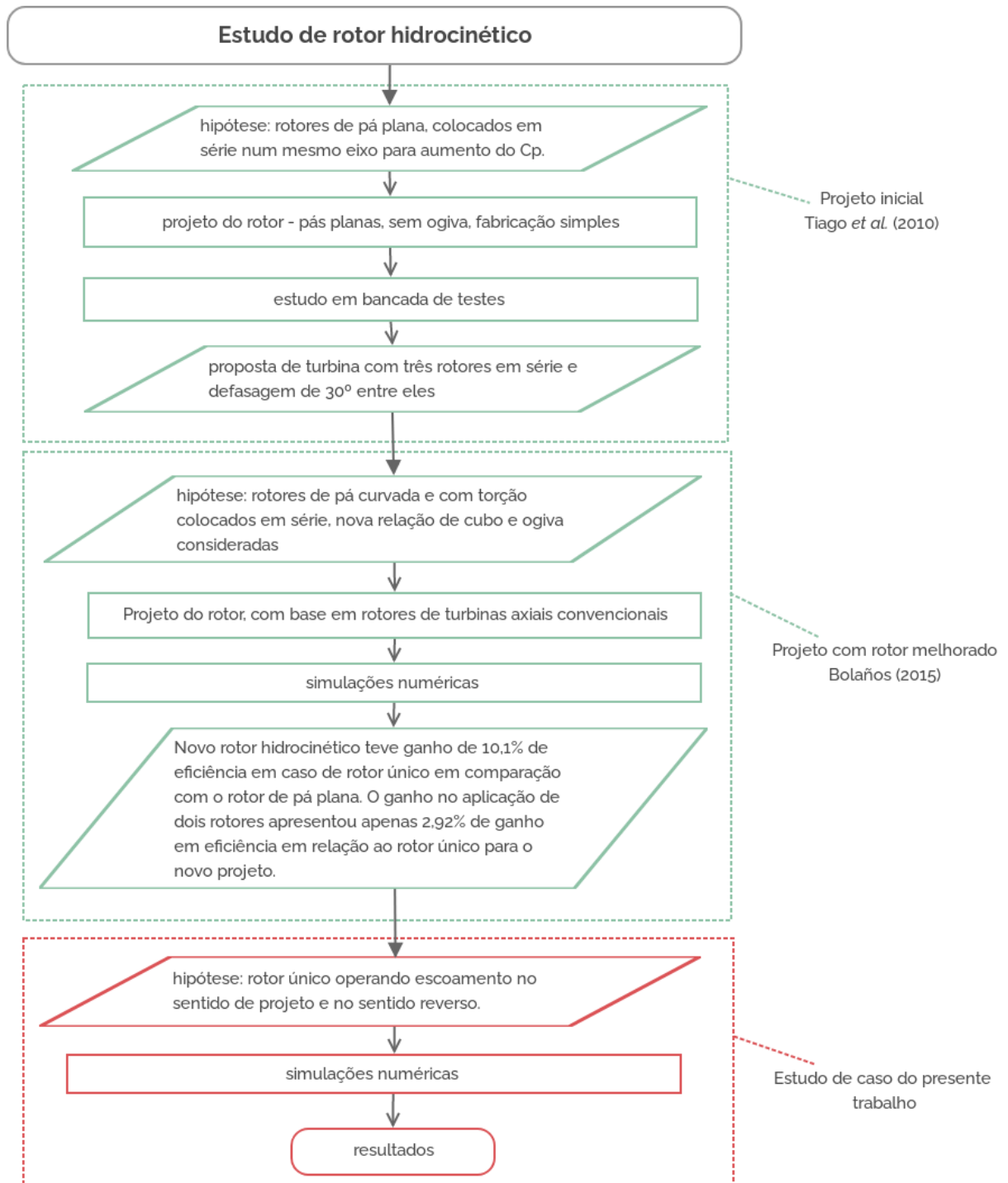


Figura 4.1: Fluxograma de desenvolvimento do rotor estudado contendo os projetos anteriores e o estudo atual

Fonte: elaboração própria

Para realização do estudo de caso, apresenta-se o projeto estudado, a partir do projeto de Bolaños (2015), e realiza-se análise utilizando CFD, com discussão de resultados para avaliação do conceito proposto.

#### 4.1. APRESENTAÇÃO DO PROJETO ESTUDADO

A seguir apresenta-se o projeto base utilizado neste estudo de caso, o projeto base foi desenvolvido por Bolaños (2015) a partir de Tiago Filho *et al.* (2010). A seguir (seções 4.1.1 e 4.1.2) são apresentadas as considerações sobre a máquina para o estudo de caso proposto nesse trabalho. Na seção final (4.1.3) da apresentação do projeto, considera-se a inovação no projeto para realização desse trabalho e uma avaliação do nível de maturidade tecnológica, baseada na classificação de TRL, para a turbina estudada.

##### 4.1.1. Rotor hidrocínético pás curvo-torcionadas e ogiva

O trabalho apresentado por Bolaños (2015) teve como objetivo melhorar o rendimento de um sistema de dois rotores hidrocínéticos colocados em série, conceito inicialmente apresentado por Tiago Filho *et al.* (2010). A melhora no rendimento foi obtida a partir do projeto do rotor considerando pá em arco de círculo, com torção ao longo do raio (pás curvo-torcionadas) e com alteração da relação de cubo de 0,250 para 0,458.

Bolaños (2015) analisou ainda a metodologia de ensaio utilizada por Tiago Filho *et al.* (2010), apontando que houve relevante influência das paredes nos ensaios experimentais que foram realizados inicialmente. Na Figura 4.2 são apresentados os rotores estudados por Tiago Filho *et al.* (2010) e Bolaños (2015).

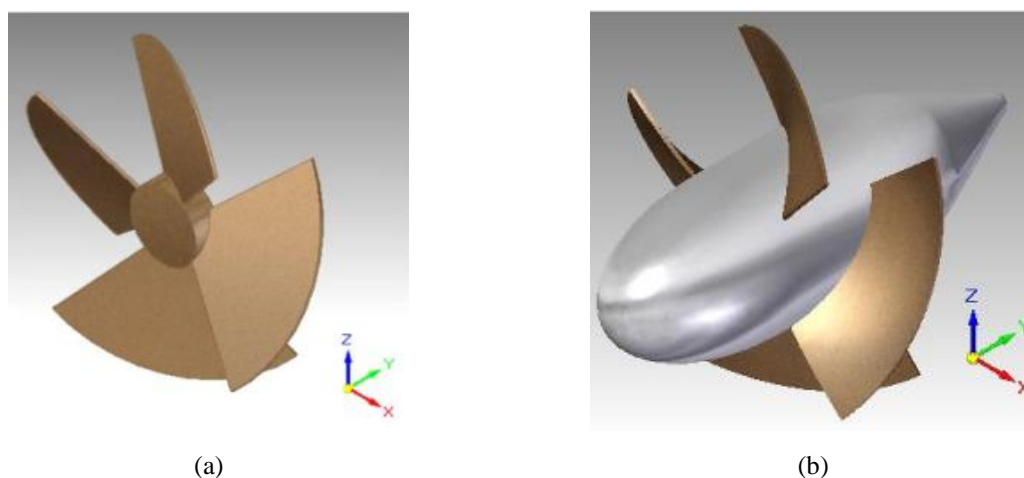


Figura 4.2: Rotores projetados anteriormente: (a) rotor de pás planas, sem ogiva; (b) rotor com pás curvo-torcionadas, com ogiva  
Fonte: Bolaños (2015)

Os dados de projeto da geometria do rotor projetado com ogiva e pás curvadas com torção ao longo do raio, ou curvo-torcionadas, (Figura 4.2 b) são apresentados no ANEXO B.

Os métodos utilizados para o projeto foram baseados na literatura clássica de projeto de turbomáquinas axiais de escoamento confinado. A análise do comportamento da turbina hidrocínética foi feita por Bolaños por meio de fluidodinâmica computacional (CFD, *Computational Fluid Dynamics*) e as simulações numéricas foram realizadas com o software ANSYS FLUENT®.

Para análise do rotor proposto, Bolaños (2015) apresentou 28 simulações para rotor único de pás planas e 28 simulações para rotor único com pás curvo-torcionadas, pois foram consideradas quatro velocidades de escoamento (1,15; 1,50; 1,75 e 2,00 m/s) e sete rotações (37, 56, 73, 96, 124, 149 e 175 rpm). Além disso, foi feita uma simulação para o ponto de maior rendimento de cada velocidade considerando dois rotores em série, tanto para o caso de pá plana quanto para o novo projeto, totalizando 64 simulações.

Os principais resultados estão no ANEXO C. Também foi feito um estudo de comprimento da esteira, muito relevante para as análises de configurações com rotores em série. Os dados de  $C_p$  máximo obtidos no estudo de Bolaños (2015), ponto de partida para o estudo do presente trabalho, são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Principais valores finais de máximo  $C_p$  para cada caso considerado

	<b><math>C_p</math> máximo [%]</b>
Pás retas – 1 rotor	21,5
Pás retas – 2 rotores	25,9
Pás curvo-torcionadas – 1 rotor	31,6
Pás curvo-torcionadas – 2 rotores	34,5

Fonte: dados de Bolaños 2015

O estudo aqui desenvolvido considera o projeto de pás curvo-torcionadas, mas considera-se apenas o caso de rotor único. Essa opção foi adotada devido ao baixo ganho de coeficiente de potência ao se adicionar mais de um rotor de pás curvadas – como é possível verificar na Tabela 4.1 – e o interesse em estudar o rotor operando com o escoamento em sentido reverso, oposto ao sentido de escoamento principal, considerando a baixa curvatura no projeto da pá.

#### **4.1.2. Considerações de projeto para o presente trabalho**

Como supracitado, utilizou-se como ponto inicial a dissertação de Bolaños (2015). A inovação do presente estudo de caso consiste na verificação da operacionalidade do rotor com dois sentidos opostos de escoamento do ponto de vista de interação entre o fluxo e o rotor.

Dessa maneira, é possível pensar na ampliação das possibilidades de aplicação do rotor também para estuários, em regime de marés.

O projeto estudado tem a relação de cubo e o projeto das pás definidos por Bolaños (2015), apresentados anteriormente e no ANEXO B. Como ogiva, optou-se por um formato de elipsoide simétrico, pensando na operação sob dois sentidos de escoamento.

As pás do projeto têm torção ao longo do raio e são curvadas em formato de arco de círculo, porém o raio da pá definido em projeto é grande em relação ao diâmetro do rotor (ver ANEXO B). Assim, o estudo apresenta a influência do raio da pá, que está em posição inadequada quando a máquina opera escoamento no sentido oposto, nas perdas. Quanto maior o raio, a pá fica mais próxima de uma pá reta, cuja operação nos dois sentidos não altera o comportamento fluidodinâmico, ou seja, para uma pá reta o Coeficiente de potência é o mesmo para os dois sentidos de escoamento.

É preciso que fique claro que a máquina operará como máquina de fluxo motora – que aproveita a energia do fluxo para mover o eixo – nos dois sentidos de escoamento. Ou seja, quando o sentido é oposto ao de projeto, conseqüentemente o rotor terá rotação em sentido oposto, devido à interação do escoamento com as pás, mas ainda assim deve operar dentro da faixa que o mantém como máquina motora, fora dessa faixa o rotor operaria como máquina geradora, seria uma bomba e não uma turbina. À luz desse limite operativo, quando operando com escoamento no sentido oposto ao de projeto, essa turbina nunca irá operar numa rotação ótima, que eliminaria choques na entrada.

Assim, justifica-se a perda de rendimento para todos os pontos de operação, esperada nesse caso. Para esclarecer esse ponto, é interessante combinar a análise do triângulo de velocidades e a equação de Euler para máquinas de fluxo axiais. As turbomáquinas axiais têm como característica a velocidade tangencial ( $\vec{u}$ ) constante para entrada e saída da máquina, considerando pontos no mesmo raio.

A equação de Euler para uma máquina axial motora pode ser escrita como na Equação 4.1:

$$Y_{p\dot{a}_\infty} = u (c_{u_4} - c_{u_5}) \quad (4.1)$$

Sendo  $Y_{p\dot{a}_\infty}$  o trabalho específico considerando o caso ideal de número de pás infinito,  $u$  a velocidade tangencial,  $c_{u_4}$  a projeção do vetor de velocidade absoluta ( $c$ ) na direção tangencial na entrada da turbina e  $c_{u_5}$  a projeção do vetor de velocidade absoluta ( $c$ ) na direção tangencial na saída da turbina.

O rotor considerado não apresenta distribuidor em nenhum dos dois sentidos de escoamento estudados, dessa maneira, para os dois casos, sabe-se que o ângulo ( $\alpha_4$ ) entre a velocidade absoluta na entrada e a velocidade tangencial é igual a  $90^\circ$  e, portanto,  $c_{u_4}$  é igual a zero. Sabe-se ainda que o valor de  $Y_{p\dot{a}_\infty}$  deve ser positivo na equação (4.1) para que a máquina de fluxo seja motora (pois é uma turbina), portanto  $c_{u_5}$  deve apresentar valor negativo, ou seja,  $\alpha_5$  deve ser maior do que  $90^\circ$ .

Isso foi levado em conta por Bolaños (2015) para o projeto do rotor. Um esquema de triângulos de velocidades para entrada (4) e saída (5) da máquina, para os dois sentidos de escoamento, é apresentado na Figura 4.3, considerando valores arbitrários.

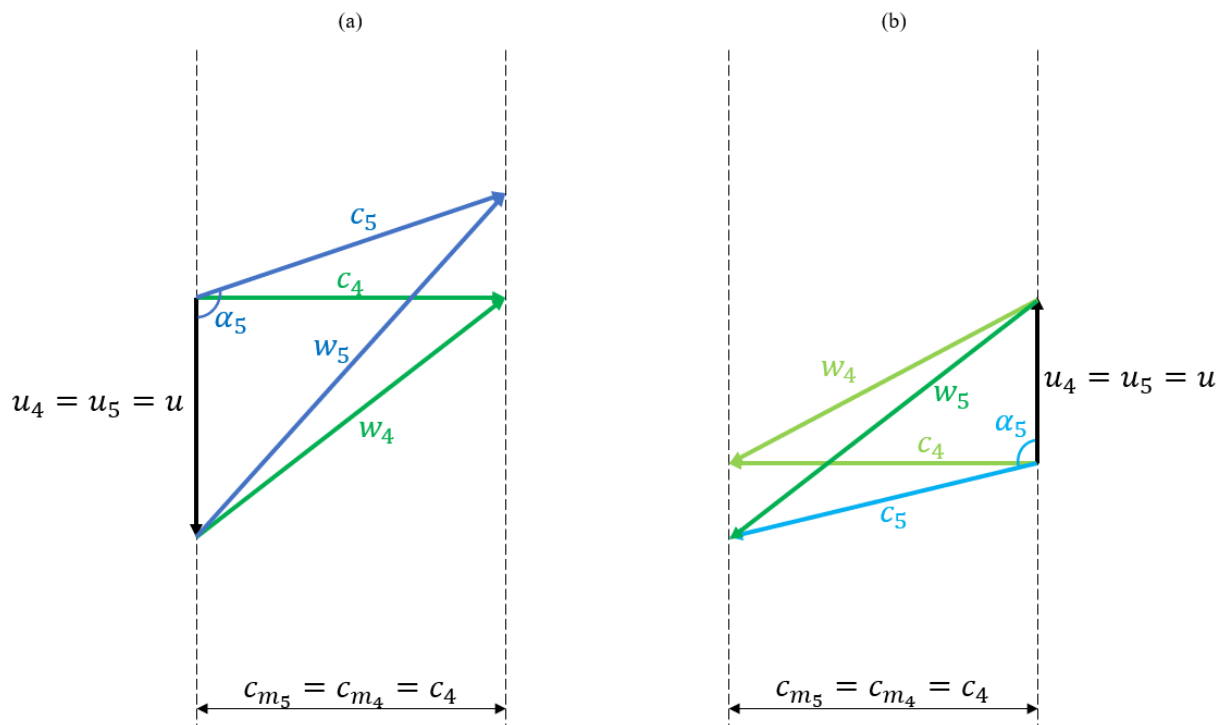


Figura 4.3: Triângulos de velocidade para entrada e saída da turbomáquina estudada (axial, sem sistema diretor). Para (a) escoamento no sentido de projeto e (b) escoamento no sentido oposto.

Fonte: Elaboração própria

O escoamento relativo,  $w$ , deve ser idealmente tangencial à pá na entrada (para escoamento sem choque na entrada) e tangencial na saída. Observando, para análise, o caso de velocidade absoluta do escoamento ( $c_4$ ) com mesmo módulo para escoamento nos dois sentidos estudados, temos que a velocidade relativa na saída para o caso da Figura 4.3 (b) assume mesma direção da velocidade absoluta na entrada do caso (a), apenas com sentido oposto, pois o que era a entrada da turbina em (a) passa a ser a saída no caso (b). Dessa maneira, é preciso reduzir a velocidade tangencial ( $\vec{u}$ ) para se manter o ângulo  $\alpha_5$  maior que  $90^\circ$ , que, como foi citado, é



condição para que o trabalho específico para número infinito de pás,  $Y_{pá_\infty}$ , seja maior do que zero.

Assim, considerando que as velocidades relativas na entrada,  $\vec{w}_4$ , e na saída,  $\vec{w}_5$ , para o caso de escoamento no sentido oposto ao de projeto nunca assumirão simultaneamente direção tangencial a pá na entrada e saída, mesmo idealmente, o escoamento sempre causará choque na turbina. Mesmo o ponto de maior rendimento, nesse caso, apresenta choque. Esse fato reduz o rendimento, como foi citado também na análise da equação de Euler e como é também possível observar nos resultados das simulações numéricas, a partir da página 77 deste trabalho.

Outro ponto interessante é que o sentido de rotação da máquina se altera com a alteração do sentido de escoamento, o que pode ser verificado pela análise dos triângulos de velocidade. O sentido da velocidade tangencial ( $\vec{u}$ ) muda de acordo com o sentido do escoamento absoluto ( $\vec{c}$ ) e conseqüente alteração da velocidade relativa ( $\vec{w}$ ).

#### 4.1.3. Avaliação do nível de maturidade tecnológica

Além das questões de ordem técnica de avaliação do comportamento da máquina em nova condição de operação, o trabalho propõe princípios para estruturação do desenvolvimento de produto em um projeto, por meio da análise dos TRL, o que se mostra proveitoso para a efetivação das pesquisas em produtos existentes no mercado, mediante desenvolvimento tecnológico futuro, organizado para avanço entre os TRL com custos e tempo otimizados. De acordo com a estrutura apresentada na seção 3.1, página 53, é possível definir uma escala TRL com atividades específicas definidas para o modelo de turbina aqui estudado.

Nota-se que uma concepção inicial de máquina pode ser desenvolvida para diversos modelos diferentes, conforme os níveis de TRL avançam, o que deve ser feito em conformidade com as necessidades que se objetiva contemplar. Nesse ponto, a concepção inicial apresentada por Tiago Filho et al. (2010) foi desenvolvida apenas nos TRL 1 e 2. O rotor inicial apresenta geometria simples com pás planas, já o rotor de Bolaños (2015) tem projeto de pás curvo-torcionadas, mas nenhum dos dois projetos passou por processo de otimização, que poderia ser realizado para definir o número de pás ou diâmetro da ogiva, por exemplo. O projeto de Bolaños considerou as diretrizes utilizadas para máquinas confinadas, essas diretrizes foram definidas empiricamente e estão estabelecidas na literatura, mas não são necessariamente ótimas para turbinas de escoamento livre. Assim, entende-se que o desenvolvimento da tecnologia é múltiplo e deve ser alinhado com possíveis aplicações reais, para manter a pesquisa alinhada com a prática.

O estudo e otimização de uma turbina hidrocínética de alta solidez com pás planas pode ser interessante para aplicações em regiões isoladas, com complexidades de logística e manutenção, devido ao esperado menor custo de fabricação. Já um rotor com pás de projeto sofisticado, podendo incluir inclusive perfis aerodinâmicos, é adequado para aplicações que têm como maior necessidade o rendimento da máquina, por exemplo para plantas com turbinas de grande porte e maiores potências instaladas.

O presente estudo de caso tem como objetivo a consolidação de resultados obtidos por Bolaños (2015) e o estudo inicial do comportamento do rotor em fluxo nos dois sentidos, utilizando análise CFD. Dessa maneira o estudo é parte do processo para que se atinja o TRL 2 de desenvolvimento do modelo de turbina. A seguir apresentam-se as simulações realizadas nessa fase de desenvolvimento do produto, compondo o estudo de caso.

#### 4.2. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

As simulações numéricas realizadas têm como objetivo, dentro de uma concepção de desenvolvimento de produto, o estudo inicial de um rotor hidrocínético axial com escoamento alternado bidirecional. Portanto, o estudo de caso faz parte dos estágios iniciais de um projeto que visa o desenvolvimento da turbina para aplicações reais.

Nessa fase de projeto é ideal utilizar baixa capacidade computacional, mantendo resultados confiáveis baseados em critérios de malha. As simulações numéricas devem acompanhar a evolução do projeto, ganhando complexidade à medida que o projeto da máquina fica mais definido, ou seja, quando as incertezas do projeto são reduzidas. Dessa maneira, garantimos que as alterações de projeto, esperadas na engenharia de produto, não tenham alto custo no atual ponto de projeto, seguindo a proposta apresentada na Figura 4.4.

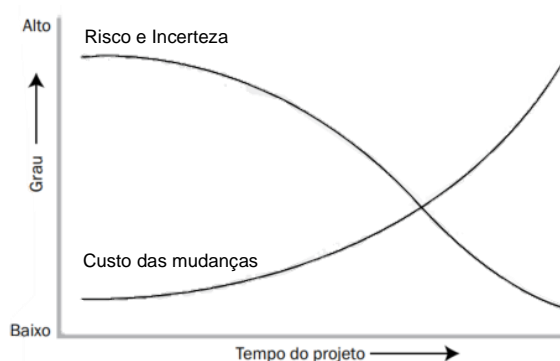


Figura 4.4: Impacto de possíveis alterações em características do produto final no decorrer de um projeto  
Fonte: Project Management Institute (2013)

A Figura 4.4 indica ainda que com o decorrer do projeto as incertezas são reduzidas, no caso do estudo e proposta de novas turbinas hidrocínéticas, isso pode ser traduzido em aumento da complexidade do projeto da máquina. Como esperado, quanto mais definido e desenvolvido o projeto, maiores os custos para alteração do projeto da máquina. Dessa maneira, é preciso delimitar os objetivos da máquina (obter menores custos ou maiores rendimentos, por exemplo) criteriosamente desde o início do projeto.

A partir dessas considerações foram determinados os métodos adequados e condizentes com as possibilidades do centro de pesquisa para a fase inicial do desenvolvimento desse modelo de turbina.

#### 4.2.1. Métodos das simulações

Para realização da análise por CFD, foi utilizado o programa ANSYS CFX® versão 17.2. Os softwares CFX® e Fluent® pertencem a ANSYS Inc. e são voltados para soluções numéricas de problemas de mecânica dos fluidos. Para a aplicação desse estudo de caso, simplificada, ambos são adequados. As configurações da geometria, malha e os parâmetros da simulação foram organizados na plataforma Workbench, facilitando a alteração de parâmetros para realização das diferentes simulações.

O computador utilizado tem as configurações apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Configurações do computador utilizado para simulações numéricas

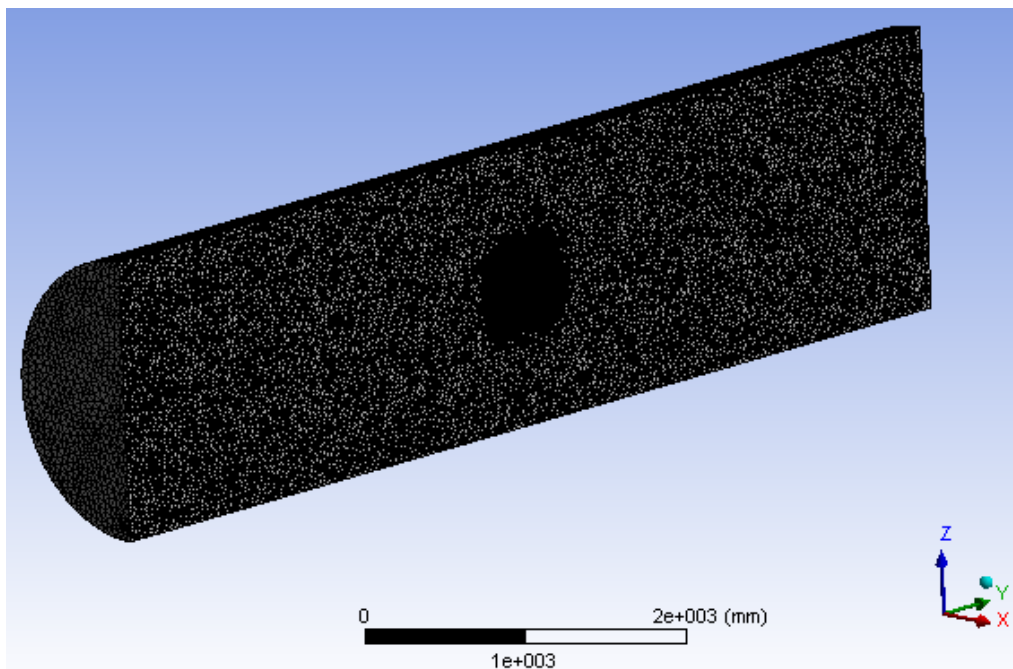
Item	Característica
Processador	Intel® Core i7-7700
Clock	3,60 GHz
Memória RAM	16 GB
Placa de Vídeo	NVIDIA 6GB

A geometria do rotor foi traçada a partir dos dados de projeto (BOLAÑOS, 2015) com o software SolidWorks 2016 (arquivo \*.x\_t) e importada para o Workbench da ANSYS. A partir da geometria, foi gerada a malha não estruturada com refino na parede por meio de camadas prismáticas (*'inflation'*). Para estudo primário da malha, foram consideradas as condições de contorno de velocidade de escoamento de 2,00 m/s, com rotação de 149 rpm, ponto próximo ao  $C_p$  ótimo, de acordo com Bolaños (2015).

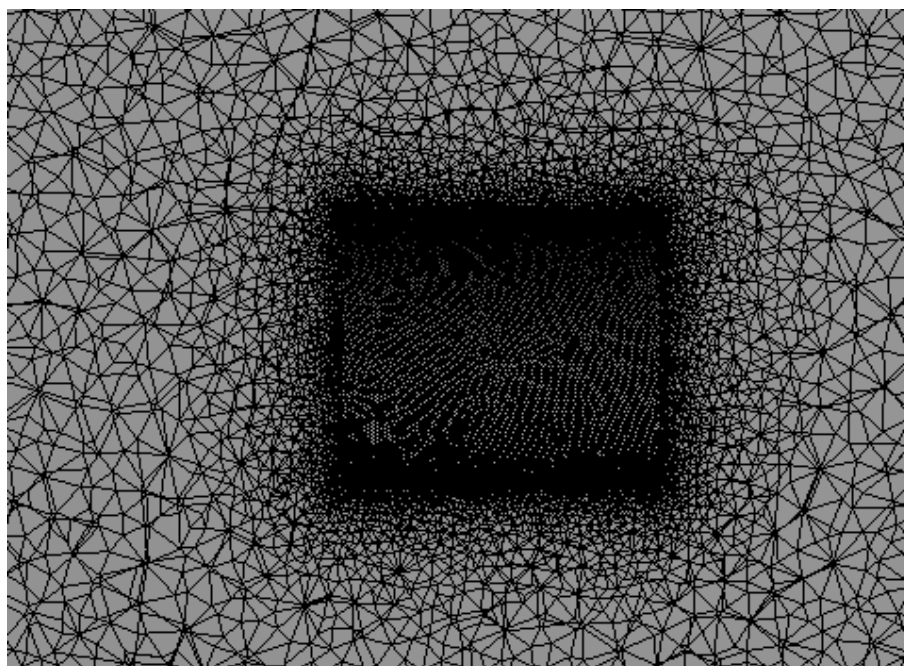
Cinco malhas foram testadas para esse ponto, sendo escolhida a malha que retornou resultados com maior correspondência com estudo prévio de Bolaños (2015) e menor tempo de processamento. Deve-se destacar que Bolaños realizou um estudo de independência de malha

para obter solução confiável, portanto considera-se que a presente metodologia foi verificada a partir do estudo de Bolaños (2015).

Foram considerados dois domínios, um estacionário e um rotativo (que inclui o rotor), o maior refino da malha fica no domínio rotativo. Como o presente trabalho considera escoamento nos dois sentidos, foi definido que o domínio estacionário teria as mesmas dimensões antes e depois da turbina. A Figura 4.5 e a Figura 4.6 apresentam a malha utilizada nos domínios inercial e não inercial, respectivamente.



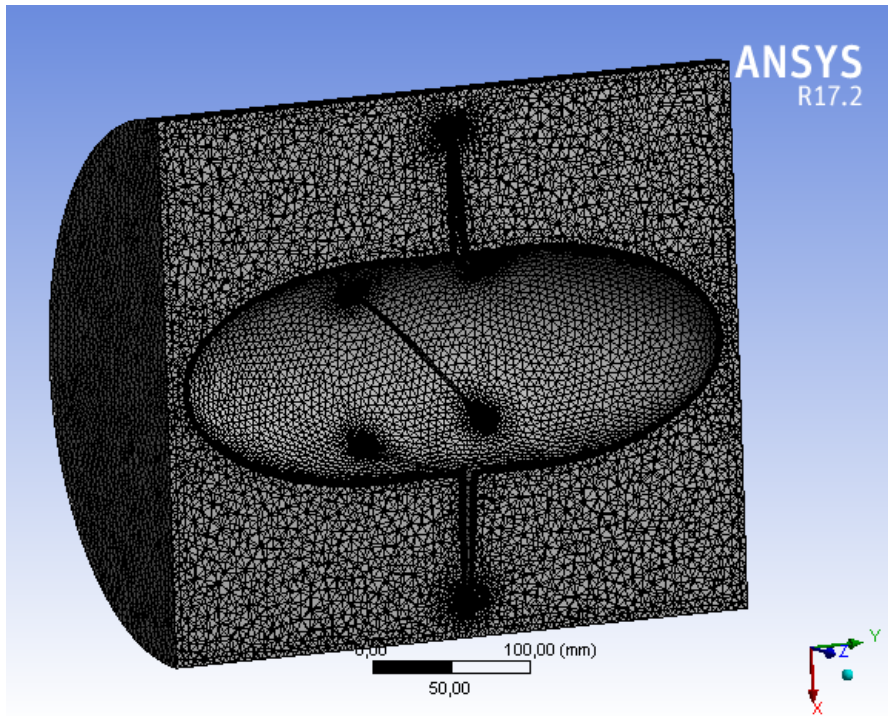
(a)



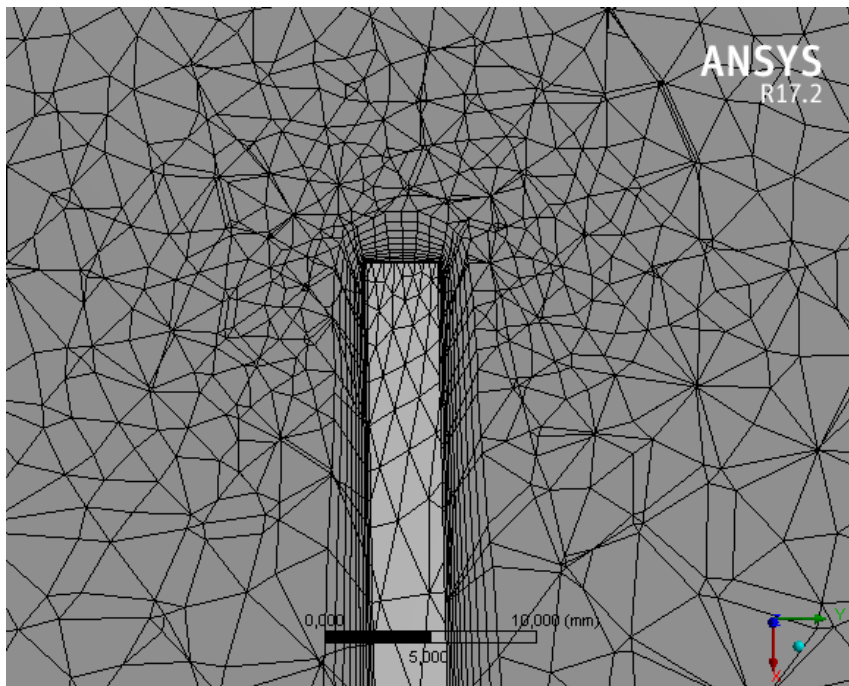
(b)

Figura 4.5: Malha do domínio estático: (a) visão geral com corte no plano XZ; (b) detalhe do refino da malha nas faces de contato com o domínio rotativo

Fonte: Elaboração própria



(a)



(b)

Figura 4.6: Malha do domínio rotativo: (a) visão geral com corte no plano XZ; (b) detalhe do refino da malha nas paredes do rotor, com uso do ‘*inflation*’  
 Fonte: Elaboração própria

Como é possível verificar na Figura 4.6 (b), foi utilizada a ferramenta ‘*inflation*’ com dez camadas para detalhar a malha próxima às paredes do rotor. A utilização do *inflation* mostrou bom resultado com baixo tempo de processamento.

Frisa-se que para estudo da malha, os resultados foram comparados com os obtidos por Bolaños (2015), o que não garante validação da simulação, já que os resultados de Bolaños

também não foram validados a partir de resultados experimentais. Porém, deve-se notar que Bolaños segue os protocolos para realizar a simulação de forma confiável, isto é: estudo de independência de malha, esquemas de solução numérica, critérios de convergência, modelos de turbulência e condições de contorno, sendo plausível a verificação de metodologia a partir de Bolaños (2015).

Como citado na seção 3.2.2, página 63 do presente trabalho, o modelo de turbulência utilizado foi o SST, baseado no  $k-\omega$ , em concordância com outros estudos em CFD de turbinas hidrocínéticas, como Bolaños (2015) e Silva *et al.* (2016).

#### 4.2.1.1. Casos simulados

Definida a malha, foram simuladas inicialmente as velocidades de escoamento: 1,17; 1,50; 1,75 e 2,00 m/s, segundo definição de Bolaños (2015). As velocidades foram simuladas tanto no sentido de projeto quanto no sentido oposto. As rotações consideradas foram: 37, 56, 73, 96, 124, 149 e 175 rpm. Assim, o estudo inicial foi feito a partir de 56 pontos simulados. Os resultados foram utilizados para traçar gráficos de interesse, inclusive gráficos com parâmetros adimensionais.

Dada a análise desses resultados, foram realizadas simulações considerando rotação constante no ponto de maior rendimento para a velocidade de 2 m/s. Para esse estudo foram consideradas as velocidades de escoamento de 1 m/s a 2 m/s com incremento de 0,25 m/s em cada nova simulação com rotação constante de 151 rpm para o sentido de projeto e 125 rpm no sentido reversa. Nesse segundo momento, portanto, 14 pontos simulados. Esse segundo estudo foi realizado para obtenção de gráficos de potência por velocidade de escoamento, considerando rotação constante.

Foi utilizada a ferramenta *Parametric* do *WorkBench ANSYS* para alterar os parâmetros. Inicialmente foram feitos oito projetos, referentes às quatro velocidades de escoamento em cada sentido, com variação das rotações realizada com auxílio da citada ferramenta. Para o estudo com rotação constante a variável estudada com a ferramenta foi a velocidade de incidência, sendo dois projetos, referentes ao sentido de escoamento.

O total de pontos simulados para obtenção dos resultados apresentados a seguir foi, portanto de 70 pontos distintos, 35 em cada sentido de escoamento.

### 4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das simulações com recursos de CFD, foram obtidos os resultados aqui apresentados e discutidos, para escoamento no sentido do projeto original e no sentido oposto.

#### 4.3.1. Escoamento no sentido do projeto original – comparação com trabalho anterior

As simulações para o rotor em seu sentido de projeto foram realizadas segundo a metodologia apresentada na Seção 4.2, página 72 deste trabalho, possibilitando verificação da metodologia a partir da comparação com os resultados de Bolaños (2015).

Como supracitado, o critério para verificação foram os valores adimensionais de Coeficiente de potência ( $C_p$ ) e razão de velocidades na ponta da pá ( $\lambda$ ) que são apresentados no gráfico da Figura 4.7, a seguir.

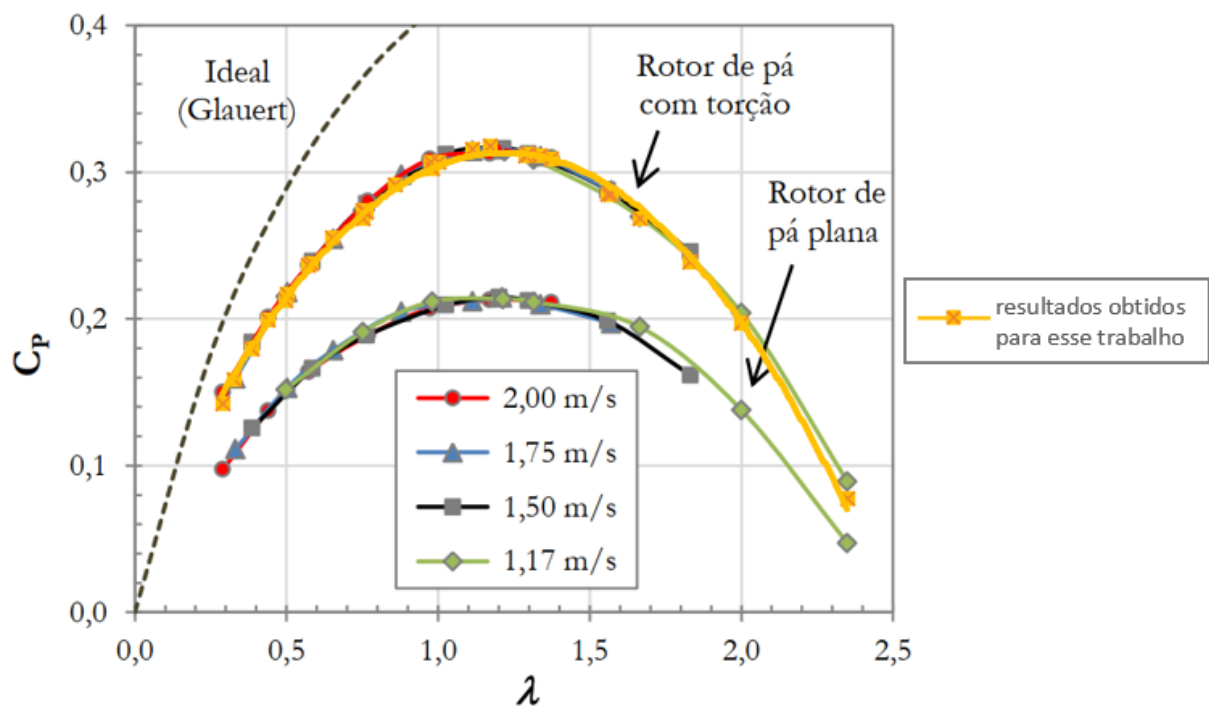


Figura 4.7: Relação  $C_p$  por  $\lambda$  obtida por Bolaños (2015) com adição da curva para o rotor de pá curvo-torcionada obtida no presente estudo na mesma faixa de velocidades

Fonte: Bolaños (2015) adaptado.

Como é possível observar na Figura 4.7, os resultados obtidos no presente trabalho tiveram grande compatibilidade com os resultados obtidos por Bolaños (2015). Como mostra a curva em amarelo, o valor obtido para  $C_p$  máximo foi 0,50% em relação ao resultado de Bolaños (2015), para o mesmo  $\lambda$ . As curvas também apresentam o mesmo comportamento, representando boa concordância entre as metodologias dos dois trabalhos.



Dessa maneira, a simulação numérica foi verificada a partir da simulação apresentada por Bolaños (2015). Essa verificação não substitui a necessidade de ensaios laboratoriais para sua validação, que são imprescindíveis para o progresso do nível de maturidade de uma tecnologia.

#### 4.3.2. Comparação de resultados para os dois sentidos

Foram realizadas, então, as simulações na mesma direção de escoamento, mas com sentido oposto, para avaliar a perda de rendimento da máquina quando operando na nova condição.

A partir dos resultados das simulações foram traçadas as curvas de potência de eixo por rotação para cada velocidade. Os resultados são apresentados na Figura 4.8 para o sentido de projeto e na Figura 4.9 para o sentido oposto.

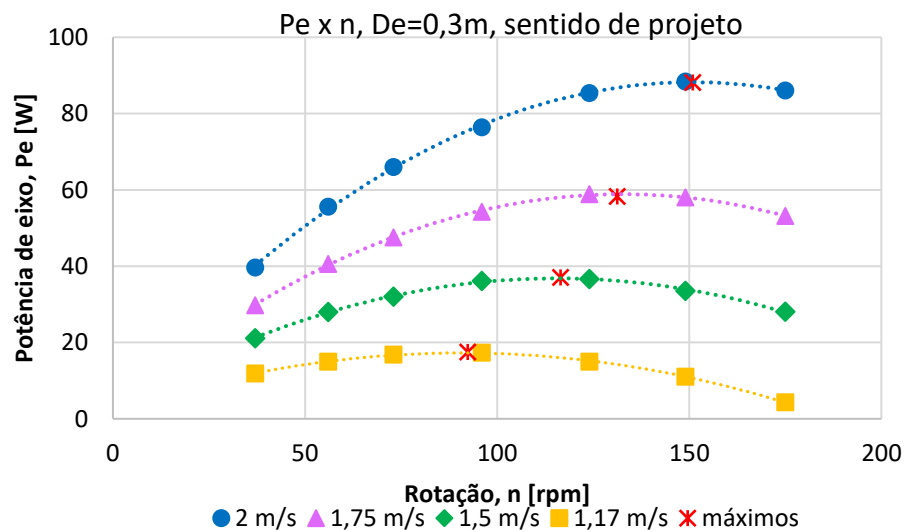


Figura 4.8: Curvas de potência de eixo por rotação para velocidades constantes de escoamento no sentido de projeto original

Fonte: elaboração própria

As curvas de potência de eixo por rotação, apresentadas na Figura 4.8, têm o comportamento esperado, comparado por exemplo com as curvas apresentadas por Hansen (2008, p. 76). As potências máximas que variaram entre 88,2 W e 17,5 W referentes às velocidades de 2 m/s e 1,17 m/s respectivamente.



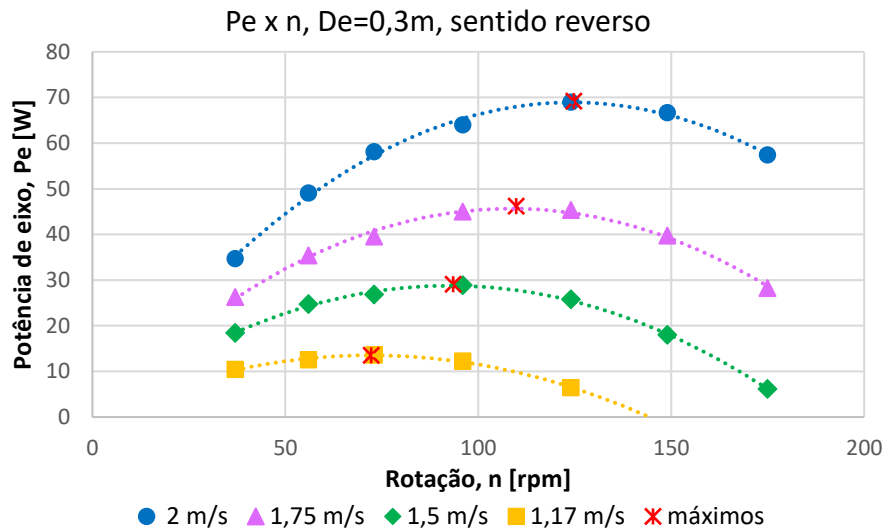


Figura 4.9 Curvas de potência de eixo por rotação para velocidades constantes de escoamento no sentido oposto ao do projeto original  
Fonte: elaboração própria

Na comparação entre a Figura 4.8 e a Figura 4.9 nota-se que o comportamento das curvas continua conforme o esperado mesmo com a alteração do sentido de escoamento no rotor. A variação de potência de eixo máxima para cada curva passou a ser entre 69,2 W e 13,5 W. As potências máximas foram obtidas igualando a derivada da função da curva de potência de eixo por rotação a zero. As funções das curvas foram consideradas polinomiais de segundo grau, por se mostrarem bem aderentes aos resultados.

Os valores de potência de eixo máxima e sua respectiva rotação são apresentados para cada velocidade de escoamento na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Dados referentes às potências máximas das simulações

Sentido de escoamento	Velocidade de escoamento [m/s]	Potência de eixo máxima [W]	Rotação [rpm]
De projeto	2,00	88,2	151
	1,75	58,3	131
	1,50	37,1	116
	1,17	17,5	92
Reverso	2,00	69,2	125
	1,75	46,2	110
	1,50	29,1	94
	1,17	13,5	72

Fonte: elaboração própria

A partir dos dados da Tabela 4.3 é possível verificar que a redução de potência entre os dois casos estudados acontece proporcionalmente à potência máxima original, ficando em torno de 21%, como é possível verificar na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: variação da potência de eixo máxima entre o sentido de projeto e o sentido reverso para cada velocidade de escoamento

Velocidade de escoamento [m/s]	Redução da potência de eixo máxima entre o sentido de projeto e o reverso [%]
2,00	21,5
1,75	20,8
1,50	21,6
1,17	22,8

Fonte: elaboração própria

Para comparação direta foi traçado em um mesmo gráfico as curvas de potência de eixo por rotação para a velocidade de 2m/s nos dois sentidos estudados. O gráfico é apresentado na Figura 4.10, a seguir.

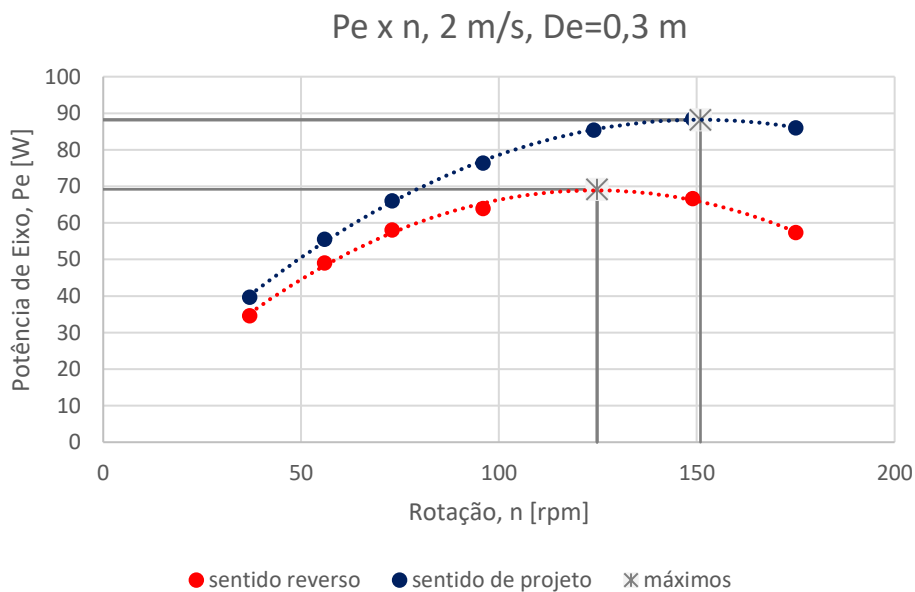


Figura 4.10: Curvas de potência de eixo por rotação para 2 m/s nos dois sentidos de escoamento

Fonte: elaboração própria

É possível observar na Figura 4.10 que a rotação ótima da turbina para uma velocidade é diferente para os dois sentidos de escoamento. Isso era esperado, pois ao impor escoamento e, sentido oposto ao de projeto em uma turbina, a interação entre o escoamento e as pás não ocorre em posição ideal. Nesse caso, no campo relativo é esperado que ocorram regiões de alta dissipação de energia, identificadas pelos choques de incidência nos bordos de ataque das pás, causados pela rotação da máquina, causando a diferença vertical entre as curvas azul e vermelha observada na Figura 4.10. Os mecanismos de perdas no rotor e na esteira são identificados numericamente através da formação de vórtices, fluxos secundários, separação das camadas

limites, entre outros. Essas modificações são intensificadas com o aumento da rotação da turbina, que tem influência na velocidade relativa do fluido que passa pela turbina.

Para maior detalhamento, foram realizadas simulações adicionais considerando rotação constante igual a rotação da potência máxima para a velocidade de 2 m/s. Conforme apresentado na Tabela 4.3 e Figura 4.7, foram considerados os valores de 151 rpm para escoamento no sentido de projeto e 125 rpm para o sentido de escoamento reverso. Os valores obtidos são apresentados no gráfico da Figura 4.11.

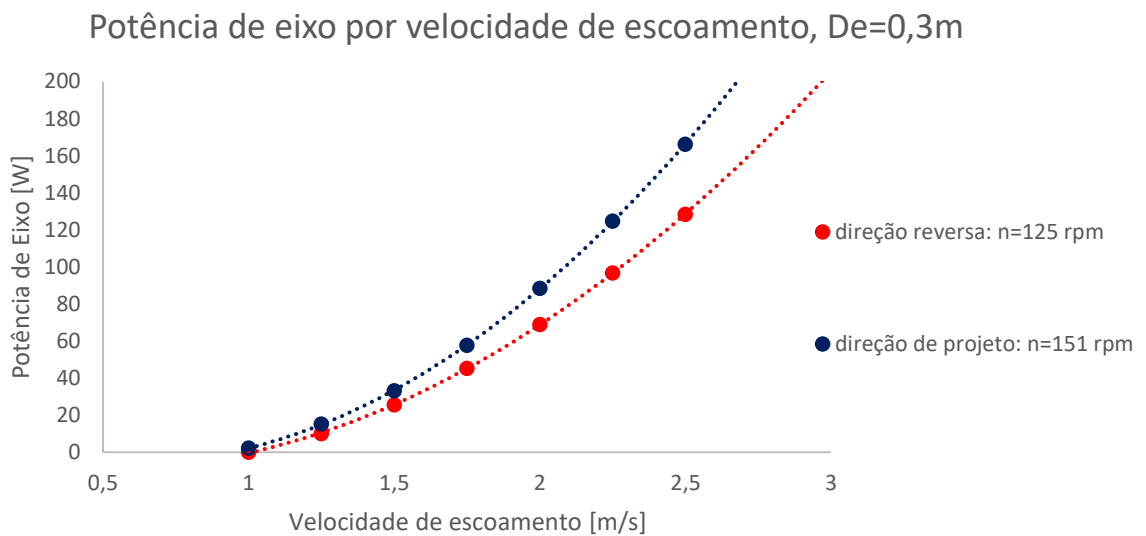


Figura 4.11: Curvas de potência de eixo por velocidade do escoamento nos dois sentidos de estudo

O comportamento das curvas da Figura 4.11 está também de acordo com a literatura – ver por exemplo Manwell (2009, p. 53), não foram modelados casos com velocidades de escoamento ainda mais altas por não serem de interesse no contexto nacional conhecido.

### 4.3.3. Resultados adimensionais e semelhança

Os resultados de comparação entre os dois sentidos de escoamento apresentados até aqui são dimensionais, ou seja, vão variar de acordo com as dimensões da turbina e com a velocidade de escoamento. Para estudo do modelo de turbina é interessante traçar um gráfico adimensional, que representa o modelo de turbomáquina, para diferentes diâmetros de rotor e rotações. É traçado então o gráfico com as curvas de coeficiente de potência ( $C_p$ ) versus razão de velocidade na ponta da pá ( $\lambda$ ), duas grandezas adimensionais, apresentado na Figura 4.12.

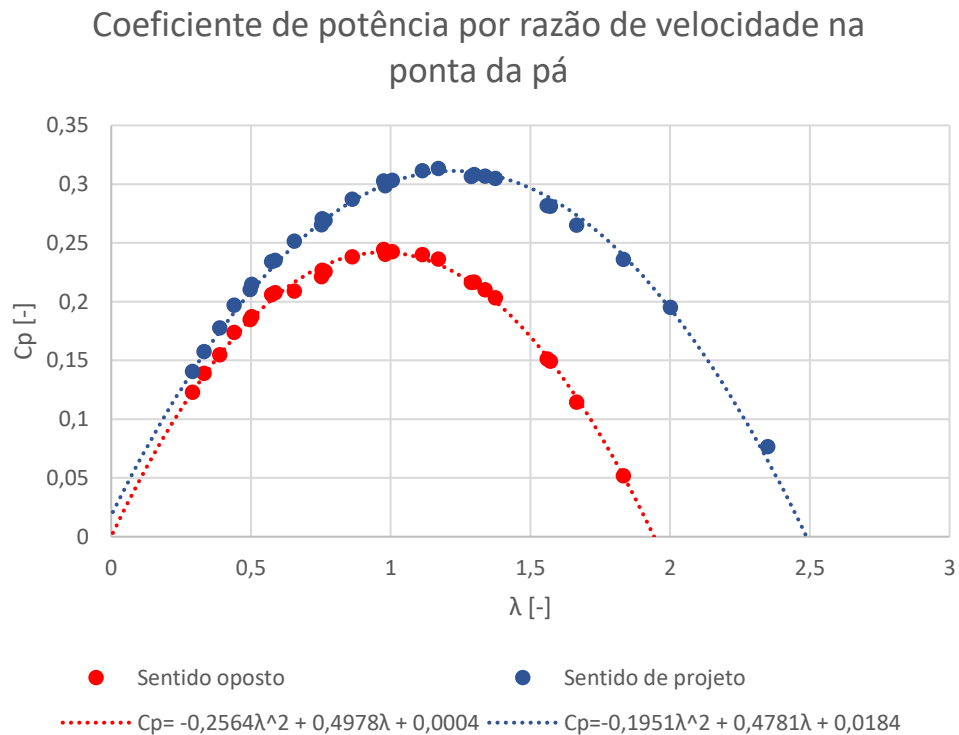


Figura 4.12: Curvas de coeficiente de potência por razão de velocidade na ponta da pá para escoamento nos dois sentidos estudados  
Fonte: Elaboração própria

Para traçado da curva utilizou-se uma aproximação em função polinomial quadrática, que se mostrou bastante *aderente* aos resultados; Ainda assim é preciso considerar que o comportamento da curva principalmente antes do ponto de menor  $\lambda$  e após o de maior  $\lambda$  simulado pode ser diferente do apresentado.

Houve redução de 31,1% para 24,2% no  $C_p$  máximo na comparação entre o sentido de projeto e o sentido oposto de escoamento, sendo que o primeiro ocorre para razão de velocidade da ponta da pá de 1,23 e o segundo para  $\lambda$  de 0,87. Além disso, é interessante notar que para menores  $\lambda$  as curvas são próximas, aumentando a distância entre o comportamento das máquinas ao aumentar a razão de velocidade da ponta da pá. Isso significa que, mantidos constantes a velocidade de escoamento e o raio da máquina, para menores rotações a máquina tem comportamento mais próximo nos dois sentidos de escoamento.

Outra observação importante é que os 24,2% de  $C_p$  é mais alto do que o valor para o primeiro projeto da máquina, de pás planas, apresentado no estudo numérico de Bolaños (2015). Para esse primeiro projeto o valor de  $C_p$  obtido foi da ordem de 21,4%. A partir desses dados é possível inferir que a influência da torção nas pás, da adequação da relação de cubo e da aplicação de uma ogiva elíptica foi maior do que as perdas causadas pelo raio invertido (em relação ao ideal de acordo com o sentido do escoamento) da pá. Esse resultado também indica

que pode ser interessante estudar rotores com pás simétricas nos dois sentidos de escoamento, inclusive planas, pois otimizações de torção, número e formato das pás, além do projeto da ogiva e adequação de relação de cubo podem ter resultados interessantes e, nesse caso, com mesmo  $C_p$  para operação nos dois sentidos de escoamento.

Tendo as curvas para o modelo de turbina aqui estudado, é interessante compará-las com turbinas já estudadas. Com esse objetivo foi traçado o gráfico da Figura 4.13, a seguir.

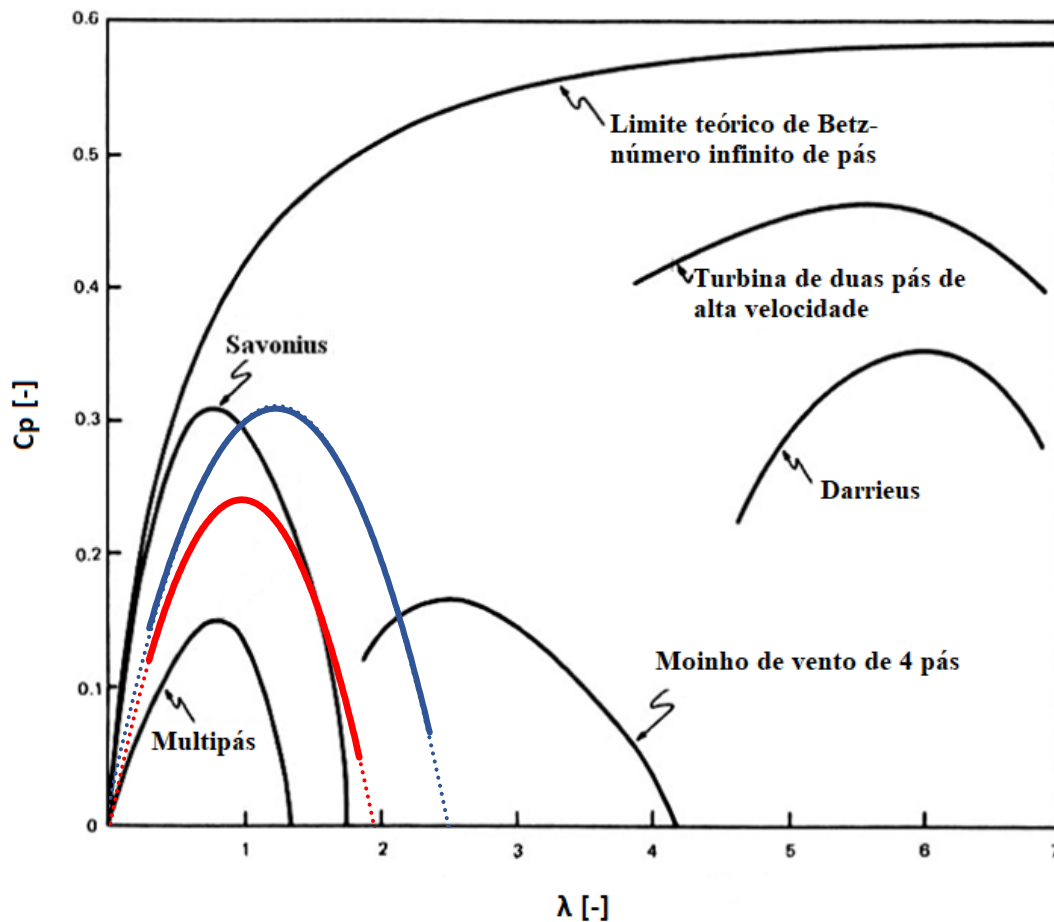


Figura 4.13: Curvas de coeficiente de potência por razão de velocidade na ponta da pá para diversos tipos de turbina de fluxo livre, com adição dos resultados numéricos para a turbina aqui estudada, com escoamento no sentido de projeto (curva azul) e no sentido oposto (curva vermelha)

Fonte: Eldridge (1975) adaptado

De acordo com as curvas traçadas na Figura 4.13, a turbina estudada apresenta um desempenho parecido com turbinas comandadas pela força de arrasto, como a Savonius e a do tipo multi-pás, sendo que, em comparação com a última, mesmo operando com escoamento em sentido oposto ao de projeto os valores de  $C_p$  são significativamente mais altos para a turbina aqui estudada. A turbina aqui apresentada também apresenta, para mesmos diâmetros de rotor e velocidades de escoamento, maiores rotações, o que pode implicar em uso de geradores de menores dimensões.

As turbinas eólicas regidas principalmente pela força de arrasto geralmente são preteridas em relação às turbinas com força de sustentação dominante, pelos altos rendimentos que as segundas conseguem atingir e por estas serem adequadas para grandes dimensões de rotores para aproveitamento energético. Mas, ao se tratar de turbinas hidrocínéticas, as possibilidades de aplicação de turbinas guiadas pela força de arrasto ganham nova possibilidade. As turbinas hidrocínéticas podem, por exemplo, ser utilizadas para eletrificação de pontos isolados de baixa demanda, nesses casos menores necessidades de manutenção e custo são determinantes na viabilidade das máquinas. Alguns estudos recentes de turbinas hidrocínéticas baseadas na força de arrasto são apresentados por Ramadan *et al.* (2020), Zhao *et al.* (2020) e Basumatary *et al.* (2021).

O estudo de turbinas que sejam geometricamente semelhantes ao modelo aqui apresentado parte dos valores adimensionais para especificar um projeto a condições reais estudadas. Petersen (1984) apresenta um estudo completo das leis de semelhança aplicadas a turbinas eólicas. As mesmas considerações são adequadas para turbinas hidrocínéticas. Esse tipo de estudo considera que é possível desconsiderar a mudança no número de Reynolds para o escoamento no modelo reduzido e no protótipo nas dimensões reais de aplicação. Além disso, considera a semelhança geométrica, ou seja, a mudança do diâmetro da turbina ocasiona mudança no desenho das pás de acordo com escala adequada.

Seguindo essas premissas, as equações (4.2) e (4.3) podem ser utilizadas para estudo do protótipo (PETERSEN, 1984).

$$\frac{Pe_1}{Pe_2} = \frac{\omega_1^3}{\omega_2^3} = \frac{n_1^3}{n_2^3} \quad (4.2)$$

$$\frac{Pe_1}{Pe_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3} \cdot \frac{R_1^5}{R_2^5} \quad (4.3)$$

Nas equações (4.2) e (4.3)  $Pe$  é a potência de eixo,  $n$  a rotação e  $R$  o raio da turbina, sendo os índices 1 e 2 referentes aos valores para modelo reduzido e protótipo aplicável, respectivamente. Os valores para modelo reduzido foram estudados numericamente no presente trabalho para o raio da turbina,  $R$ , de 0,15 m. A aplicação das leis de semelhança deve ser feita após a validação do modelo numérico por meio de estudos experimentais e definição das

condições limitantes da aplicação real definida, utilizando as curvas de comportamento obtidas para modelos numéricos validados ou em ensaios de modelo físico.

É importante considerar que, ao aumentar o diâmetro da máquina, é preciso adequar a rotação da máquina para, preferencialmente, manter uma densidade de potência de mesma ordem das obtidas para o modelo reduzido. Dessa maneira, garante-se que as faixas de razão de velocidade na ponta da pá – grandeza adimensional da máquina,  $\lambda$  – sejam as do modelo estudado. Ratificando o estudo apresentado por Petersen (1984), Gasch e Twele (2012) apresentam três pontos necessários, mas não suficientes, para que os valores de coeficientes adimensionais, como por exemplo o  $C_p$ , sejam mantidos para diferentes diâmetros da máquina, são eles:

- Manter a faixa de razão de velocidade na ponta da pá,  $\lambda$ ;
- Manter o perfil das pás, o número de pás e o material do modelo reduzido;
- Alterar o diâmetro da máquina na mesma escala que a alteração das demais dimensões do rotor.

Esse é um ponto crítico do projeto dessa máquina. Para manter as faixas de  $\lambda$  em velocidades de escoamento abaixo de 2,5 m/s e considerando maiores potências instaladas e, portanto, maiores diâmetros da turbina, as rotações operadas devem ser muito baixas para se manter as densidades de potência em valores adequados. Essa característica pode inviabilizar o projeto do ponto de vista da máquina elétrica, o que deve ser estudado em paralelo ao desenvolvimento futuro do projeto do rotor.

Como exemplo, foram realizados os cálculos considerando o modelo do presente estudo de caso (diâmetro de 0,3 m) e protótipos com as dimensões de diâmetro externo igual a 0,5; 0,75; 1,00; 1,25 e 1,50 m e escoamento apenas no sentido de projeto. Foram consideradas as razões de velocidade na ponta da pá,  $\lambda$ , (obtidas para o modelo reduzido em cada velocidade de escoamento, entre 1,0 e 2,5 m/s com rotação igual a 151 rpm) constantes ao se variar o diâmetro da máquina. A partir desses dados, utilizando a equação (2.6), são obtidos os valores de rotação para cada diâmetro considerado, conforme apresentado no gráfico da Figura 4.14.

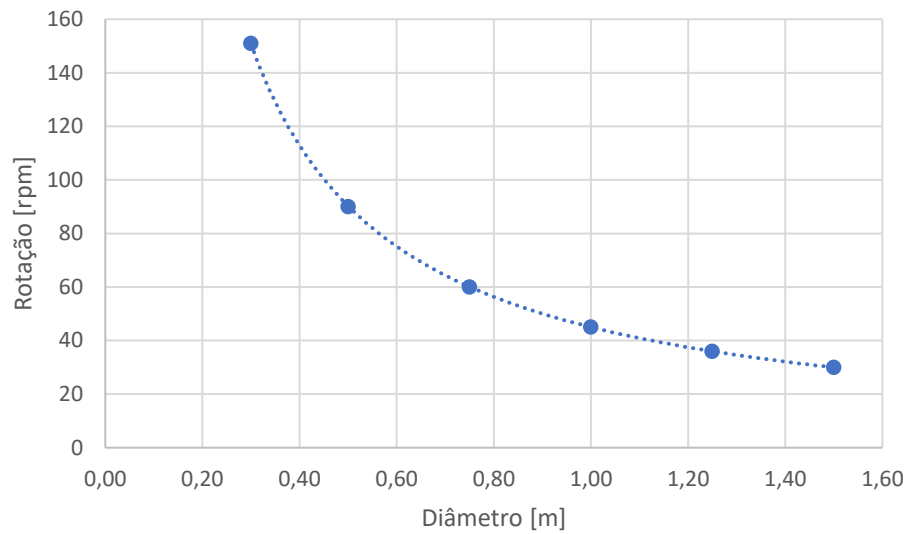


Figura 4.14: Variação da rotação de acordo com o diâmetro para se manter a razão de velocidades na ponta da pá de acordo com o modelo reduzido  
Fonte: Elaboração própria

Utilizando os dados obtidos para aplicação na equação (4.3), é possível traçar novas curvas de potência de eixo por velocidade de escoamento, considerando rotações constantes para cada curva que mantém a densidade de potência nos valores do modelo reduzido.

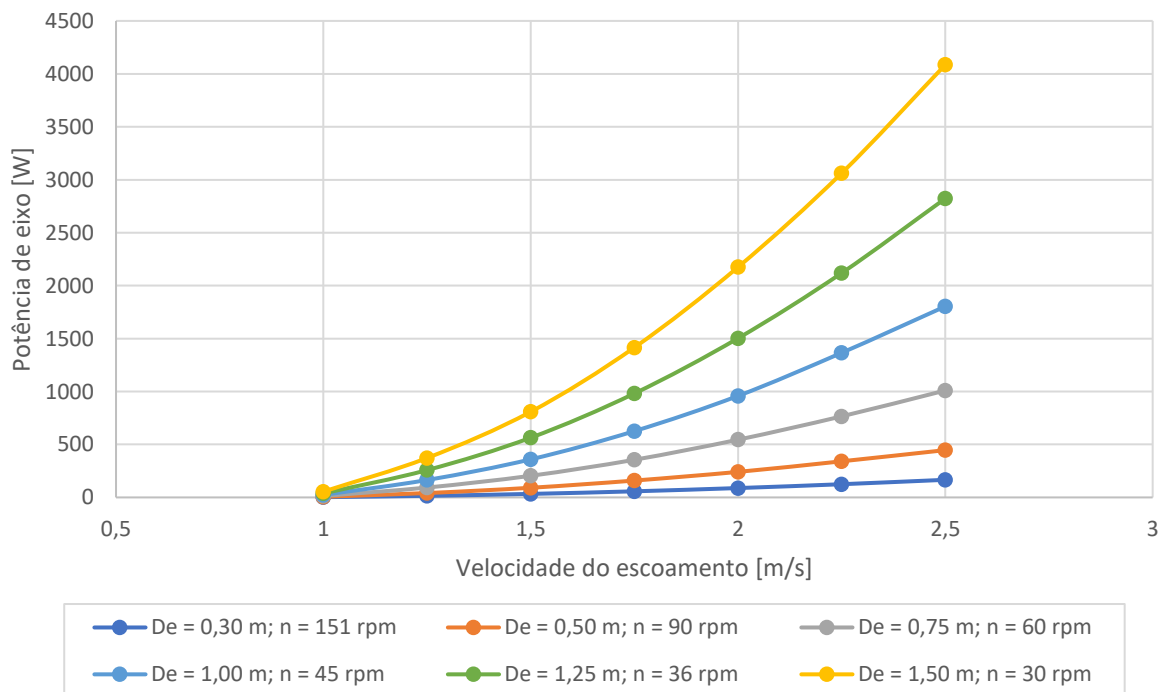


Figura 4.15: Curvas de potência de eixo por velocidade de escoamento para o modelo reduzido e para protótipos de diferentes dimensões  
Fonte: Elaboração própria

Na Figura 4.15 é possível observar o expressivo aumento da potência de eixo com a variação do diâmetro da máquina, como era de se esperar, já que a equação 4.2 apresenta o



valor do raio da turbina elevado à quinta potência. Além disso, verifica-se que, de fato, as rotações obtidas para maiores diâmetros desse modelo de turbina são baixas. Esse ponto deve ser levado em conta no projeto da máquina, considerando, por exemplo, um multiplicador de velocidades para possibilitar a aplicação de um gerador elétrico de dimensões viáveis.

A partir dos mesmos dados, é possível também traçar curvas de potência de eixo por diâmetro externo do rotor, para velocidades de escoamento constantes, conforme apresentado na Figura 4.16.

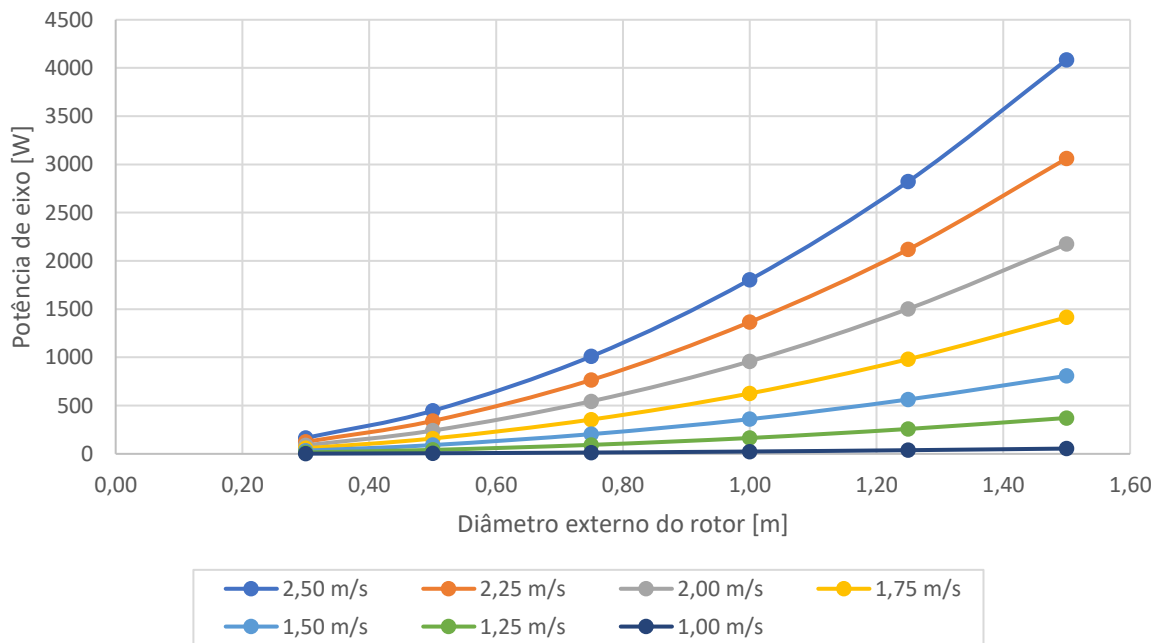


Figura 4.16: Curvas que relacionam a potência de eixo e o diâmetro de rotor necessário, considerando velocidade de escoamento constante  
Fonte: Elaboração própria

Dada uma condição real de velocidade de escoamento em local que se pretende instalar um protótipo, escolhe-se a curva adequada na Figura 4.16. Então é possível determinar o diâmetro necessário para geração de uma potência de eixo desejada. Definido o diâmetro, determina-se a rotação necessária com auxílio da curva da Figura 4.14.

A análise de semelhança, avaliando diferentes diâmetros de protótipos, é importante para quantificar os custos associados diretamente ao projeto do sistema de geração, isto é, fabricação da turbina, montagem e transporte de todo o sistema de geração em função da potência ser instalada. É necessário detalhamento futuro dessa análise, principalmente considerando dados validados com modelos físicos, à medida que o projeto da máquina se torne mais complexo e avance entre os níveis de maturidade tecnológica, TRL.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES

O estudo aqui desenvolvido dá uma visão geral da conjuntura nacional de aproveitamento energético. O perfil renovável das matrizes energética elétrica do Brasil é significativo, por incluir principalmente fontes internas ao país, sendo que essas fontes são cada vez mais importantes dadas as alterações climáticas de influência antropocêntrica atrelada à emissão de gases do efeito estufa. Manter essas características das matrizes energética e elétrica nacionais é um desafio que envolve aspectos ambientais, sociais e técnicos. É, portanto, uma oportunidade para o desenvolvimento da engenharia nacional alinhada com o contexto mundial de transição energética.

O aproveitamento descentralizado das fontes de energia, com participação complementar de diferentes fontes é uma tendência da transição energética, caracterizada também pela redução de emissões de gases de efeito estufa e digitalização na produção, transmissão e distribuição de eletricidade, forma de energia que tem importância e demanda crescente nesse contexto. Portanto, o desenvolvimento tecnológico de aproveitamento de fontes energéticas antes inviáveis é essencial, incluindo nessa condição as turbinas hidrocínéticas, foco do presente trabalho.

A tecnologia hidrocínética, que aproveita diretamente a energia cinética dos escoamentos não confinados, está em desenvolvimento no mundo, com interesse crescente. A partir do trabalho e das publicações atuais sobre o tema, conclui-se que existe muito campo para desenvolvimento tecnológico desse tipo de turbina, cujo conhecimento ainda não foi completamente estabelecido. Nesse sentido, é de interesse ordenar os projetos de pesquisa para atrelar o que é produzido na academia com as necessidades sociais e possibilidades reais de aplicação.

Na busca de uma maneira efetiva de planejamento desses projetos, o trabalho apresenta um estudo sobre níveis de maturidade tecnológica (ou TRL, do inglês *Technology Readiness Levels*). Os TRL têm sido utilizados para orientação na alocação de recursos para pesquisas e na gestão de projetos também energéticos. A definição dos requisitos para progresso de um TRL a outro deve ser clara e adequada para o tipo de tecnologia estudado, visto que esse tipo de avaliação pode ser empregado para o desenvolvimento de tecnologias das mais diversas áreas e surgiu como recurso para orientação da NASA em seus projetos espaciais. Essa se mostra uma ferramenta útil para o estudo de turbinas hidrocínéticas, visando aplicações reais e desenvolvimento de produto, já que o progresso tecnológico efetivo depende, além do estudo

técnico, de ordenação também institucional e de trabalho alinhado em diversas áreas de conhecimento, considerando as necessidades e possibilidades existentes.

O outro ponto do trabalho é o estudo de caso. Nele uma metodologia de avaliação hidrodinâmica de um modelo de turbina hidrocínética por meio de CFD foi aplicada. A metodologia foi verificada por meio de comparação de resultados com estudo anterior apresentado por Bolaños (2015). O diferencial foi utilizar a metodologia verificada para analisar a máquina operando escoamento no sentido oposto ao de projeto, visando assim ampliar as possibilidades de aplicação da máquina para aplicação em estuários, em regime de marés.

Esse estudo amplia os conhecimentos sobre essa máquina que foi inicialmente projetada e apresentada por Tiago *et al.* (2010) e melhorado por Bolaños (2015). Os resultados se mostraram promissores para estudos futuros. A turbina apresenta característica próxima a turbinas de força de arrasto regente, geralmente aplicáveis a pequenos aproveitamentos. Para eletrificação de regiões isoladas, o estudo apresenta outra vantagem: como propõe-se utilizar a turbina numa posição fixa para os dois sentidos de escoamento, não existe a necessidade de equipamentos para reorientar a turbina de acordo com o sentido da maré, podendo reduzir a necessidade de manutenção, ponto crítico em regiões isoladas.

Portanto, buscou-se, por meio da apresentação do contexto, das noções de TRL e do estudo de caso, promover o desenvolvimento da promissora tecnologia hidrocínética. Essa tecnologia apresenta ainda desafios técnicos inconclusos – que podem ser traduzidos em oportunidades para o progresso da engenharia e de tecnologias também nacionais.

## **5.1. SUMÁRIO DE RESULTADOS**

Um resumo dos níveis de maturidade tecnológica para turbinas hidrocínéticas é apresentado no Quadro 3.1, página 57 e não será aqui repetido. A consulta a esse quadro pode ser de interesse para planejamento e inicialização de projetos de pesquisa em turbinas hidrocínéticas, visando otimização de tempo e recursos.

Com relação ao estudo de caso, entende-se que, ao lado das conclusões apresentadas, os principais resultados de simulação são as curvas adimensionais, apresentadas na Figura 4.12, página 82 desse trabalho. As variáveis de interesse, obtidas na modelagem numérica para o ponto de maior rendimento para cada velocidade, são apresentados na Tabela 5.1, a seguir.

Tabela 5.1: Sumário de resultados das simulações

	Velocidade [m/s]	Cp [%]	$\lambda$ [-]	$n_{\text{ótima}}$ [rpm]	Pe [W]	Dp [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Sentido de projeto</b>	1,17	31,0%	1,24	92,4	17,5	247,6
	1,50	31,2%	1,22	116,5	37,1	524,9
	1,75	30,8%	1,18	131,3	58,3	824,8
	2,00	31,3%	1,19	150,9	88,2	1247,8
<b>Sentido Reverso</b>	1,17	23,9%	0,97	72,3	13,5	191,0
	1,50	24,4%	0,98	93,5	29,1	411,7
	1,75	24,4%	0,99	109,8	46,2	653,6
	2,00	24,5%	0,98	124,8	69,2	979,0

Fonte: Elaboração própria

Na tabela, Cp é o coeficiente de potência máximo para aquela velocidade, é o principal parâmetro de turbinas de fluxo livre, pois representa um rendimento da máquina.  $\lambda$  é a razão de velocidade na ponta da pá;  $n_{\text{ótima}}$  é a rotação em que, para aquela velocidade de escoamento, o Cp é o informado na tabela. Pe é a potência de eixo referente ao mesmo ponto e Dp é a densidade de potência.

O estudo de semelhança de turbinas hidrocínéticas foi apresentado e iniciado. A partir dele é possível considerar as necessidades de projeto para se projetar aplicações reais de protótipos de turbinas desse modelo. Para tanto, é necessário antes realizar uma série de estudos para progresso na escala de níveis de maturidade tecnológica, TRL.

## 5.2. TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados e conclusões obtidos para o estágio atual da pesquisa apresentados nesse trabalho, é possível pensar em estudos futuros para o desenvolvimento dessa tecnologia hidrocínética para aproveitamento energético. Alguns deles são descritos a seguir.

Considerando os níveis TRL apresentados no presente trabalho, para desenvolvimento dessa turbina específica, os seguintes estudos são necessários para conclusão do TRL 2:

- Estudos de otimização considerando número de pás, projeto das pás – incluindo estudos com outros perfis de pás, por exemplo simétricos, para operação em dois sentidos. Para esses estudos é possível utilizar a metodologia de simulações numéricas apresentada ao longo desse trabalho. É interessante levar em conta as análises de semelhança para os estudos iniciais, propondo máquinas que sejam adequadas para maiores potências, objetivo de aplicações reais.
- Estudo dos princípios de turbinas inseridas em dutos, por exemplo do tipo venturi, com o objetivo de aumentar o rendimento da máquina sob mesma condição de escoamento.

- Estudos estruturais da máquina otimizada, para garantir resistência necessária à operação.
- Estudo detalhado do comportamento do escoamento, iniciado no presente trabalho (APÊNDICE B, página 114), mas que pode ser detalhado com o uso de modelos numéricos específicos – por exemplo detalhamento da malha após o rotor e correlação com os resultados de potência.
- Estudo de escoamento transiente, de acordo com condições reais de aplicação em marés. Esse estudo é imprescindível para aplicações reais. Devem ser considerados dados de ciclos de marés reais para o estudo energético da turbina em operação, determinando a posição ideal do rotor, para melhor equilíbrio da carga no tempo de acordo com os períodos de escoamento em cada sentido.
- Estudos de outros componentes do conjunto como o gerador elétrico e estudos de tribologia, essenciais para o bom funcionamento do sistema, podendo ser um limitante à aplicabilidade.

Realizados esses estudos citados, ou outros definidos como necessários, e atingido o TRL2, os ensaios experimentais passam a ser primordiais. A partir dos testes em laboratório, serão validados os modelos numéricos, possibilitando adequações de projeto e definição de trabalhos futuros para progredir nos níveis TRL seguintes, inclusive utilizando as leis de semelhança aqui apresentadas para definição de projetos de protótipos com dimensões reais de aplicação.

Outra possibilidade do estudo experimental é desenvolver tabelas e gráficos específicos para projeto de turbinas hidrocínéticas, visto que o projeto aqui estudado utilizou como base dados para turbinas convencionais (escoamento confinado) axiais (BOLAÑOS, 2015). Dessa maneira é possível também planejar o projeto de diferentes modelos de turbinas para ampliar as possibilidades de aplicação.

Considerando não apenas o estudo de caso aqui apresentado, é possível também traçar outros trabalhos futuros de interesse ao desenvolvimento tecnológico de turbinas hidrocínéticas, como os listados a seguir.

- Estudos de avaliação de recursos energéticos para turbinas hidrocínéticas. É imprescindível que sejam realizadas pesquisas para levantamento de potencial hidrocínético tanto fluvial quanto oceânico no Brasil, incluindo estudos de estuários e marés. Esses estudos podem ser orientados por simulações numéricas

iniciais, com posterior levantamento de dados em campo. Esse tipo de estudo orienta o desenvolvimento de turbinas adequadas para a realidade nacional.

- Estudos de possibilidades institucionais, avaliação de políticas públicas e estudos econômicos. Dessa maneira é possível propor medidas institucionais alinhadas com a realidade técnica, social e ambiental do país, em prol do desenvolvimento em todas essas linhas.
- Estudos a respeito de democracia energética e promoção do conhecimento científico fora da academia, com o objetivo de fomentar a consciência respeito de questões energéticas, que são estratégicas no desenvolvimento de uma nação. Dessa maneira, pressiona-se o poder público a direcionar decisões públicas para o bem comum.
- Estudos sobre o impacto ambiental das turbinas hidrocínéticas, ainda pouco aplicadas em situações reais de interação com fauna e flora.

Os estudos citados nessa seção do trabalho são poucos exemplos dentro de um assunto que está em fase de desenvolvimento no mundo. Sendo assim, um tema fértil, com ampla gama de possibilidades para desenvolvimento em diferentes contextos, inclusive na realidade de país atualmente em desenvolvimento.

## REFERÊNCIAS

ACHARYA, R. **Investigation of Differences in Ansys Solvers CFX and Fluent.** (Masters in Fluid Dynamics) - Mechanics Institution, Royal Institute of Technology, KTH. Stockholm, 48 p., 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Perdas de Energia Elétrica na Distribuição.** Brasília, Distrito Federal, 2019. Disponível em: [https://www.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relatório+Perdas+de+Energia\\_+Edição+1-2019-02-07.pdf/d7cc619e-0f85-2556-17ff-f84ad74f1c8d](https://www.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relatório+Perdas+de+Energia_+Edição+1-2019-02-07.pdf/d7cc619e-0f85-2556-17ff-f84ad74f1c8d).

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa n 167, de 10 de Outubro de 2005.** Estabelece as condições para comercialização de energia proveniente de Geração Distribuída., Brasília, 2005. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2005167.pdf>. Acesso em: 1 out. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa n 228, de 25 de Julho de 2006.** Estabelece os requisitos para a certificação de centrais geradoras termelétricas na modalidade de geração distribuída, para fins de comercialização de energia elétrica no Ambiente de Contratação Regulada –ACR, na forma do artigo 14, inciso II, do Decreto n 5.163, de 30 de julho de 2004., Brasília, 2006. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2006228.pdf>. Acesso em: 1 out. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa n 482, de 17 de Abril de 2012.** Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências., Brasília, 2012a. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 24 set. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa n 517, de 11 de Dezembro de 2012.** Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e o Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição –PRODIST., Brasília, 2012b. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012517.pdf>. Acesso em: 1 out. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa n 687, de 24 de Novembro de 2015.** Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição –PRODIST., Brasília, 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 24 set. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa**

**n 77, de 18 de Agosto de 2004.** Estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidrelétricos e aqueles com base em fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada., Brasília, 2004. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2004077.pdf>. Acesso em: 2 out. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa n 786, de 17 de Outubro de 2017.** Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012., Brasília, 2017. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2017786.pdf>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resumo por tipo de Geração.** 2020a. Unidades consumidoras com Geração distribuída. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD\\_Fonte.asp](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp). Acesso em: 29 set. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA.** 2020b. Geração. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: 23 set. 2020.

ANSYS INC. **ANSYS CFX: Introduction.** . Canonsburg, ANSYS INC. , 2013

ANSYS INC. **ANSYS CFX: Solver Theory Guide.** . Canonsburg, ANSYS INC. , 2009

ANYI, M., KIRKE, B. "Evaluation of small axial flow hydrokinetic turbines for remote communities", **Energy for Sustainable Development**, v. 14, n. 2, p. 110–116, 2010. DOI: 10.1016/j.esd.2010.02.003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2010.02.003>.

AUSTRALIAN RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Technology Readiness Levels for Renewable Energy Sectors.** . Australia, ARENA, 2014. Disponível em: <https://arena.gov.au/knowledge-bank/technology-and-commercial-readiness-tools/>.

AZEVEDO, T. M. de. **Validação Numérica-Experimental do Comportamento Hidrodinâmico de uma Turbina Hélice em Escala Reduzida.** 2020. 98 f. Universidade Federal de Itajubá - Unifei, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/2202>. Acesso em: 10 fev. 2021.

BASUMATARY, M., BISWAS, A., MISRA, R. D. "Experimental verification of improved performance of Savonius turbine with a combined lift and drag based blade profile for ultra-low head river application", **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 44, p. 100999, 1 abr. 2021. DOI: 10.1016/j.seta.2021.100999. .

BLAZQUEZ, J., FUENTES, R., MANZANO, B. "On some economic principles of the energy transition", **Energy Policy**, v. 147, n. January, p. 111807, 2020. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111807. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111807>.

BOLAÑOS, G. A. I. **Estudo e melhoramento de uma turbina hidrocínética**



**multiestágio**. 2015. Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), 2015. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/510>. Acesso em: 6 nov. 2020.

**BOTAN, A. C. B. Desenvolvimento de uma turbina de fluxo reversível para uso em usina maremotriz com operação em duplo efeito**. 2014. 125 f. Universidade Federal de Itajubá - Unifei, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jsui/handle/123456789/447>. Acesso em: 10 fev. 2021.

**BOTAN, A. C. B. Estudo de otimização em um modelo de turbina hidráulica tipo bulbo aplicada em condições de ultrabaixa queda**. 2019. 117 f. Universidade Federal de Itajubá - Unifei, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jsui/handle/123456789/2129>. Acesso em: 10 fev. 2021.

**BRASIL. Decreto de 02 de dezembro de 1999**. Institui o Programa Nacional de Eletrificação Rural “Luz no Campo”, e dá outras providências., Presidência da República - Casa Civil, 1999. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/dnn/anterior\\_a\\_2000/1999/Dnn8715.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/dnn/anterior_a_2000/1999/Dnn8715.htm). Acesso em: 24 set. 2020.

**BRASIL. Decreto n 4.873, de 11 de Novembro de 2003**. Institui o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica - “LUZ PARA TODOS” e dá outras providências., Presidência da República - Secretaria-Geral, 2003. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/2003/D4873.HTM](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2003/D4873.HTM). Acesso em: 24 set. 2020.

**BRASIL. Decreto n 5.163, de 30 de Julho de 2004**. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências., Presidência da República - Casa Civil, 2004a. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2004/decreto/D5163.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/D5163.htm). Acesso em: 24 set. 2020.

**BRASIL. Decreto n 9.357, de 27 de Abril de 2018**. Altera o Decreto nº 7.520, de 8 de julho de 2011, que institui o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica - “LUZ PARA TODOS”, Presidência da República - Secretaria-Geral, 2018. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2015-2018/2018/Decreto/D9357.htm#art1](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2018/Decreto/D9357.htm#art1). Acesso em: 24 set. 2020.

**BRASIL. Lei n. 13.169, de 6 de Outubro de 2015**. Altera a Lei nº 7.689, de 15 de dezembro de 1988, para elevar a alíquota da Contribuição Social sobre o Lucro Líquido - CSLL em relação às pessoas jurídicas de seguros privados e de capitalização, e às referidas nos incisos I a VII, IX e X do § 1º do art., Câmara dos Deputados, 2015. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2015/lei-13169-6-outubro-2015-781720-normaatualizada-pl.html>. Acesso em: 2 out. 2020.

BRASIL. **Lei n. 9.427, de 26 de dezembro de 1996**. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências., Presidência da República - Casa Civil, 1996. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9427cons.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9427cons.htm). Acesso em: 18 set. 2020.

BRASIL. **Lei n 10.848, de 15 de Março de 2004**. Autoriza a criação da Empresa de Pesquisa Energética – EPE e dá outras providências., Presidência da República - Casa Civil, 2004b. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2004/lei/110.847.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.847.htm). Acesso em: 16 set. 2020.

BYRNE, J., LUND, P. D. "Clean energy transition—our urgent challenge: an editorial assay", **Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment**, v. 6, n. 1, p. 2016–2018, 2017. DOI: 10.1002/wene.243. .

CAGLAR, A. E. "The importance of renewable energy consumption and FDI inflows in reducing environmental degradation: Bootstrap ARDL bound test in selected 9 countries", **Journal of Cleaner Production**, v. 264, p. 121663, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121663>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620317108>.

CALESTOUS, J. "Complexity, Innovation, and Development: Schumpeter Revisited", **Journal on Policy and Complex Systems**, v. 1, n. 1, p. 4–21, 2014. DOI: 10.18278/jpcs.1.1.1. .

CASTRO, N. J. de, BRANDÃO, R., DANTAS, G., *et al.* **Texto de Discussão do Setor Elétrico 44: Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE 2020: análise do método, metas e riscos**. GESEL- Grupo de Estudos do Setor Elétrico. Rio de Janeiro, GESEL, 2012. Disponível em: [http://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/18\\_TDSE44.pdf](http://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/18_TDSE44.pdf).

CELIK, I. "RANS/LES/DES/DNS: The Future Prospects of Turbulence Modeling", **Journal of Fluids Engineering**, v. 127, p. 829–830, 2005. .

CHICA, E., RUBIO-CLEMENTE, A., "Design of Zero Head Turbines for Power Generation". In: ISMAIL, B. I. (Org.), **Renewable Hydropower Technologies**, [S.l.], InTech, 2017. v. i. p. 25–52. DOI: 10.5772/66907. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/renewable-hydropower-technologies>. Acesso em: 16 out. 2020.

DAGNINO, R. **Neutralidade da ciência e determinismo tecnológico: um debate sobre a Tecnociência**. 1. ed. Campinas, Editora Unicamp, 2008.

DENG, G., ZHANG, Z., LI, Y., *et al.* "Prospective of development of large-scale tidal current turbine array: An example numerical investigation of Zhejiang, China", **Applied**

**Energy**, v. 264, n. March, 2020. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114621. .

DI SILVESTRE, M. L., FAVUZZA, S., RIVA SANSEVERINO, E., *et al.* "How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 93, n. June, p. 483–498, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.05.068. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.068>.

DRIESEN, J., BELMANS, R. "Distributed generation: Challenges and possible solutions", **2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES**, p. 1–8, 2006. DOI: 10.1109/pes.2006.1709099. .

DUARTE, P., "O fim do progresso". In: NOVAES, A. (Org.), **Dissonâncias do Progresso**, 1. ed. São Paulo, Edições Sesc São Paulo, 2019. p. 79–110.

ELBATRAN, A. H., AHMED, Y. M., SHEHATA, A. S. "Performance study of ducted nozzle Savonius water turbine, comparison with conventional Savonius turbine", **Energy**, v. 134, p. 566–584, 2017. DOI: 10.1016/j.energy.2017.06.041. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.041>.

ELDRIDGE, F. R. **Wind Machines**. Washington, National Science Foundation (U.S.), 1975.

ELETROBRAS. **Potencial Hidrelétrico Brasileiro**. 2018. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Potencial-Hidreletrico-Brasileiro.aspx>. Acesso em: 22 set. 2020.

ELS, R. H. van, BRASIL JUNIOR, A. C. P. "The Brazilian Experience with Hydrokinetic Turbines", **Energy Procedia**, v. 75, p. 259–264, ago. 2015. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.328. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610215010966>.

EMEC. **About us**. 2020a. European Marine Energy Centre. Disponível em: <http://www.emec.org.uk/about-us>. Acesso em: 3 nov. 2020.

EMEC. **Projects**. 2020b. European Marine Energy Centre. Disponível em: <http://www.emec.org.uk/projects/>. Acesso em: 3 nov. 2020.

EMEC. **Technology Readiness Levels**. 2020c. Wave and tidal energy testing. Disponível em: <http://www.emec.org.uk/services/pathway-to-emec/technology-readiness-levels/>. Acesso em: 12 nov. 2020.

EMEC. **Tidal Clients**. 2020d. European Marine Energy Centre. Disponível em: <http://www.emec.org.uk/about-us/our-tidal-clients/>. Acesso em: 3 nov. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional - BEN 2016: ano base 2015**. . Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia, 2016a. Disponível

em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 29 set. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional - BEN 2018: ano base 2017**. . Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia, 2018a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 29 set. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional - BEN 2019: ano base 2018**. . Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia, 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 22 set. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Considerações sobre a Expansão Hidrelétrica nos Estudos de Planejamento Energético de Longo Prazo**. . Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia, 2018b. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Considerações sobre a Expansão Hidrelétrica nos Estudos de Planejamento Energético de Longo Prazo.pdf>. Acesso em: 06 out. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. . Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia, 2020a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2029>. Acesso em: 29 set. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Relatório Síntese: BEN 2016 - ano base 2015**. . Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia, 2016b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 29 set. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Relatório Síntese: BEN 2017 - ano base 2016**. . Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia, 2017. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 29 set. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Relatório Síntese: BEN 2020 - ano base 2019**. . Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia, 2020b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 29 set. 2020.

GALDINO, M. A., VIEIRA, L. dos S. R., CARDOSO, B. R. "Prospeção Sobre O Aproveitamento Das Correntes Marinhas Para Geração De Energia Eletrica No Brasil". 2018.

**Anais** [...] Gramado, Associação Brasileira de Energia Solar - ABENS, 2018.

GANDRA, Alana. "Preço do gás e desemprego elevam uso da lenha para cozinhar no Brasil". **Agência Brasil**, 30 jun. 2019. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-06/preco-do-gas-e-desemprego-elevam-uso-da-lenha-para-cozinhar-no-brasil>. Acesso em: 17 set. 2020.

GASCH, R., TWELE, J., "Scaling wind turbines and rules of similarity". In: GASCH, R., TWELE, J. (Org.), **Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation**, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 257–271. DOI: 10.1007/978-3-642-22938-1\_7. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-22938-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-22938-1_7).

GATSKI, T. B., RUMSEY, C. L., "Linear and Nonlinear Eddy Viscosity Models". In: LAUNDER, B., SANDHAM, N. (Org.), **Closure Strategies for Turbulent and Transitional Flows**, Cambridge, England, Cambridge University Press, 2010. p. 9–46. DOI: 10.1017/CBO9780511755385.003.

GE, Mengpin, FRIEDRICH, Johannes. "4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors". **World Resources Institute**, 6 fev. 2020. Disponível em: <https://www.wri.org/blog/2020/02/greenhouse-gas-emissions-by-country-sector>. Acesso em: 7 out. 2020.

GLOBAL RESOURCE INFORMATION DATABASE - GENEVA. **Trends in Atmospheric Carbon Dioxide Concentration over 800.000 years**. 2020. Graphs. Disponível em: <https://graphs.unepgrid.ch/>. Acesso em: 8 out. 2020.

GOLECHA, K., ELDHO, T. I., PRABHU, S. V. "Influence of the deflector plate on the performance of modified Savonius water turbine", **Applied Energy**, v. 88, n. 9, p. 3207–3217, 2011. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.03.025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.025>.

GÓRALCZYK, A., ADAMKOWSKI, A. "Model of a Ducted Axial-Flow Hydrokinetic Turbine - Results of Experimental and Numerical Examination", **Polish Maritime Research**, v. 25, n. 3, p. 113–122, 2018. DOI: 10.2478/pomr-2018-0102. .

GÜNEY, M. S., KAYGUSUZ, K. "Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 2996–3004, 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2010.06.016. .

GUODONG, Q., PING, L., XIANGLIAN, W. "Development of ocean energy technologies: A case study of china", **Advances in Mechanical Engineering**, v. 2013, 2013. DOI: 10.1155/2013/941781. .

HANSEN, M. O. L. **Aerodynamics od Wind Turbines**. 2. ed. London, Earthscan, 2008.

HARDING, S. F., BRYDEN, I. G. "Directionality in prospective Northern UK tidal current energy deployment sites", **Renewable Energy**, v. 44, p. 474–477, 2012. DOI: 10.1016/j.renene.2012.02.003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.02.003>.

HÉDER, M. "From NASA to EU: The evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation", **Innovation Journal**, v. 22, n. 2, p. 1–23, 2017. .

HEIDEGGER, M. **Ensaios e Conferências**. 1. ed. Petrópolis, Vozes, 2001.

HOLANDA, P. da S., BLANCO, C. J. C., MESQUITA, A. L. A., *et al.* "Assessment of hydrokinetic energy resources downstream of hydropower plants", **Renewable Energy**, v. 101, p. 1203–1214, 2017. DOI: 10.1016/j.renene.2016.10.011. .

IBGE. **Domicílios particulares permanentes, por alguns serviços e bens duráveis existentes nos domicílios, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação**. 2000. Censo demográfico - 2000 - Resultados da Amostra. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=783>. Acesso em: 24 set. 2020.

IBGE. **Domicílios particulares permanentes, por existência de energia elétrica, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação**. 2010. Censo demográfico - 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=P13&uf=00>. Acesso em: 24 set. 2020.

INEOF. **Material das apresentações**. 2018. I Workshop de Energias Oceânicas e Fluviais. Disponível em: <http://www.ineof.ufma.br/node/42>. Acesso em: 26 out. 2020.

INEOF. **Material das apresentações**. 2019. II Workshop de Energias Oceânicas e Fluviais. Disponível em: <http://www.ineof.ufma.br/node/43>. Acesso em: 26 out. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Access to Electricity**. 2019a. World Energy Outlook. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections/access-to-electricity#abstract>. Acesso em: 16 set. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Electricity generation by source**. 2020a. Data and statistics. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Electricity and heat&indicator=Electricity generation by source>. Acesso em: 17 set. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The Critical Role of Buildings: perspectives for the Clean Energy Transition**. 2019b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-critical-role-of-buildings>. Acesso em: 6 out. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Total Energy Supply by Source**. 2020b. Data and statistics. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics>. Acesso em: 16 set. 2020.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Post-COVID recovery: An agenda for resilience, development and equality**. . Abu Dhabi, IRENA, 2020a. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Post-COVID-Recovery>. Acesso em: 7 out. 2020.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2020**. . Abu Dhabi, IRENA, 2020b. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2020>. Acesso em: 7 out. 2020.

IYER, A. S., COUCH, S. J., HARRISON, G. P., *et al.* "Variability and phasing of tidal current energy around the United Kingdom", **Renewable Energy**, v. 51, p. 343–357, 2013. DOI: 10.1016/j.renene.2012.09.017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.09.017>.

JENKINS, K., MCCAULEY, D., FORMAN, A. "Energy justice: A policy approach", **Energy Policy**, v. 105, n. February, p. 631–634, jun. 2017. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.01.052. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421517300691>.

JENKINS, K., MCCAULEY, D., HEFFRON, R., *et al.* "Energy Justice: a conceptual review", **Energy Research and Social Science**, v. 11, p. 174–182, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.10.004>.

JENKINS, K., SOVACOOOL, B. K., MCCAULEY, D. "Humanizing sociotechnical transitions through energy justice: An ethical framework for global transformative change", **Energy Policy**, v. 117, n. February, p. 66–74, 2018. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.02.036. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.02.036>.

KHAN, M. J., BHUYAN, G., IQBAL, M. T., *et al.* "Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review", **Applied Energy**, v. 86, n. 10, p. 1823–1835, 2009. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.02.017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.02.017>.

KOENIG, Ruediger. "The three Ds for modern power". **Power Engineering International**, 21 maio 2017. Disponível em: <https://www.powerengineeringint.com/digitalization/the-three-ds-of-modern-power/>. Acesso em: 29 set. 2020.

KOLLGAARD VOIGT, L. **Comparison of Turbulence Models for Numerical Calculation of Air Flow in an annex 20 Room**. . Kongens Lyngby, Denmark, Technical University of Denmark, 2000. Disponível em: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/comparison->

of-turbulence-models-for-numerical-calculation-of-airf. Acesso em: 4 fev. 2021.

KONDER, L. **O que é dialética**. 28. ed. São Paulo, Brasiliense, 2008.

KUMAR, D., SARKAR, S. "A review on the technology, performance, design optimization, reliability, techno-economics and environmental impacts of hydrokinetic energy conversion systems", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 796–813, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.247. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.247>.

LAGO, L. I., PONTA, F. L., CHEN, L. "Advances and trends in hydrokinetic turbine systems", **Energy for Sustainable Development**, v. 14, n. 4, p. 287–296, 2010. DOI: 10.1016/j.esd.2010.09.004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2010.09.004>.

LAMY, J. V., AZEVEDO, I. L. "Do tidal stream energy projects offer more value than offshore wind farms? A case study in the United Kingdom", **Energy Policy**, v. 113, n. October 2017, p. 28–40, 2018. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.10.030. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.030>.

LAWS, N. D., EPPS, B. P. "Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 1245–1259, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.189. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.189>.

LIU, Y., PACKY, D. J. "Combined-cycle hydropower systems - The potential of applying hydrokinetic turbines in the tailwaters of existing conventional hydropower stations", **Renewable Energy**, v. 66, p. 228–231, 2014. DOI: 10.1016/j.renene.2013.12.007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.007>.

LORENZO, S. **Follow the signals: a global energy transition is happening; let's make it just, fair and equitable**. 2016. WWF. Disponível em: <https://www.wwf.org/?276893/Follow-the-signals-a-global-energy-transition-is-happening-lets-make-it-just-fair-and-equitable>. Acesso em: 9 out. 2020.

LOZORNIO, E. J. C., MORO, R. L., SOUZA, J. F. T. de, *et al.* "Políticas públicas para o fomento da inserção da energia eólica na composição da matriz brasileira de oferta de energia elétrica". 2017. **Anais** [...] São Paulo, FEA USP - XIX ENGEMA, 2017. p. 15.

MALDAR, N. R., NG, C. Y., OGUZ, E. "A review of the optimization studies for Savonius turbine considering hydrokinetic applications", **Energy Conversion and Management**, v. 226, p. 113495, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113495>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689042031027X>.

MANKINS, J. C. "Technology readiness assessments: A retrospective", **Acta Astronautica**, v. 65, n. 9–10, p. 1216–1223, 2009. DOI: 10.1016/j.actaastro.2009.03.058.



Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.03.058>.

MANKINS, J. C. "Technology readiness levels", **A White Paper**, 2004. Disponível em: [https://aiaa.kavi.com/apps/group\\_public/download.php/2212/TRLs\\_MankinsPaper\\_1995.pdf](https://aiaa.kavi.com/apps/group_public/download.php/2212/TRLs_MankinsPaper_1995.pdf).

MANWELL, J. F., MCGOWAN, J. G., ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained: theory, design and application**. 2. ed. Chichester, John Wiley & Sons, 2009.

MCCLELLAN, J. **Opportunity in the Old Dominion: What the Virginia Clean Economy Act Means for Business**. Webinar, Advanced Energy Economy, 2020. Disponível em: <https://info.aee.net/opportunity-in-the-old-dominion-what-the-virginia-clean-economy-act-means-for-business>. Acesso em: 8 out. 2020.

MENTER, F. R. "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications", **AIAA Journal**, v. 32, n. 8, p. 1598–1605, 1994. DOI: 10.2514/3.12149. .

MENTER, F. R., KUNTZ, M., LANGTRY, R. "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model Turbulence heat and mass transfer", **Turbulence, Heat and Mass Transfer**, v. 4, n. July 2014, p. 625–632, 2003. .

MILLER, V. B., RAMDE, E. W., GRADOVILLE, R. T., *et al.* "Hydrokinetic power for energy access in rural Ghana", **Renewable Energy**, v. 36, n. 2, p. 671–675, fev. 2011. DOI: 10.1016/j.renene.2010.08.014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148110003848>.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Fontes renováveis sobem 0,6 ponto percentual na Matriz Energética**. 2020. Notícias. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/todas-as-noticias/-/asset\\_publisher/pdAS9IcdBICN/content/fontes-renovaveis-sobem-0-6-ponto-percentual-na-matriz-energetica](http://www.mme.gov.br/todas-as-noticias/-/asset_publisher/pdAS9IcdBICN/content/fontes-renovaveis-sobem-0-6-ponto-percentual-na-matriz-energetica). Acesso em: 17 set. 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Pesquisa Quantitativa Domiciliar de Avaliação da Satisfação e de Impacto do Programa Luz para Todos Principais Resultados**. Brasília, MME, 2009. Disponível em: [http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Resultado\\_Pesquisa\\_2009\\_nacional.pdf](http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Resultado_Pesquisa_2009_nacional.pdf).

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Portaria (MME) n 538 de 15 de Dezembro de 2015**. Brasília, MME, 2015. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-federal/portarias/portarias-mme/2015&item=pmme-538--2015>. Acesso em: 2 out. 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Portaria (MME) n 65, de 27 de Fevereiro de 2018**. 2018. Diário Oficial da União. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/diarios/179480339/dou-secao-1-28-02-2018-pg-93?ref=goto>.

Acesso em: 1 out. 2020.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Biomass**. 2019. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/biomass.html>. Acesso em: 21 set. 2020.

NACHTANE, M., TARFAOUI, M., GODA, I., *et al.* "A review on the technologies, design considerations and numerical models of tidal current turbines", **Renewable Energy**, v. 157, p. 1274–1288, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2020.04.155. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.155>.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Scientific Consensus: Earth's Climate is Warming**. 2013. Global Climate Change: Vital Signs of the Planet. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/scientific-consensus/>. Acesso em: 6 out. 2020.

NIEBUHR, C. M., VAN DIJK, M., NEARY, V. S., *et al.* "A review of hydrokinetic turbines and enhancement techniques for canal installations: Technology, applicability and potential", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 113, n. April, p. 109240, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.06.047. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.047>.

NIELSEN, K. **Report T02-0.0 Development of Recommended Practices for Testing and Evaluating Ocean Energy Systems, OES-IA Annex II Extension Summary Report Front**. . Ramboll, Denmark, IEA, 2010.

NUNES, M. M., MENDES, R. C. F., OLIVEIRA, T. F., *et al.* "An experimental study on the diffuser-enhanced propeller hydrokinetic turbines", **Renewable Energy**, v. 133, p. 840–848, 2019. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.056. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.056>.

OLIVEIRA, V. A. F. **Modelagem para viabilidade de turbinas hidrocínicas em comunidades isoladas**. 2015. 88 f. Universidade de Brasília (UNB), 2015.

OLIVEIRA, W. **Apostila de Máquinas de Fluxo - UNIFEI**. . Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, 2015.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Mapas para download**. 2020a. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Acesso em: 18 set. 2020.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **O que é ONS**. 2020b. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>. Acesso em: 22 set. 2020.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **O Sistema Interligado Nacional**. 2020c. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 22 set. 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Acordo de Paris. Convenção**

**Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas.** Paris, ONU, 2015a. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris/item/10710.html>. Acesso em: 7 out. 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Adoção do acordo paris. Convenção Quadro sobre Mudança do Clima.** Paris, ONU, 2015b. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/node/88191>. Acesso em: 7 out. 2020.

OUR WORLD IN DATA. **Global carbon dioxide emissions.** 2020. Our World In Data. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>. Acesso em: 8 out. 2020.

PALLOTTA, A., PIETROGIACOMI, D., ROMANO, G. P. "HYBRI – A combined Savonius-Darrieus wind turbine: Performances and flow fields", **Energy**, v. 191, p. 116433, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116433>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219321280>.

PAMPLONA, Nicola, ALBUQUERQUE, Ana Luiza. "Com alta do gás, 1,2 mi domicílios apelaram a lenha ou carvão em 2017". **Folha de São Paulo**, 26 abr. 2018. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2018/04/com-alta-do-gas-12-mi-domicilios-apelaram-a-lenha-ou-carvao-em-2017.shtml?origin=folha>. Acesso em: 17 set. 2020.

PEÑUELAS, J., CARNICER, J. "Climate change and peak oil: The urgent need for a transition to a non-carbon-emitting society", **Ambio**, v. 39, n. 1, p. 85–90, 2010. DOI: 10.1007/s13280-009-0011-x. .

PETERSEN, H. **Simplified Laws of Simialrity for Wind Turbine Rotors.** Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi. Roskilde, Denmark, Danmarks Tekniske Universitet, 1984. Disponível em: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/simplified-laws-of-similarity-for-wind-turbine-rotors>. Acesso em: 27 nov. 2020.

POMPEO, M. R. **On the U.S. Withdrawal from the Paris Agreement.** 2019. U.S. Department of State. Disponível em: <https://www.state.gov/on-the-u-s-withdrawal-from-the-paris-agreement/>. Acesso em: 7 out. 2020.

PRASAD, S. **Conservation vs. Non-Conservation Forms of Governing Equations.** 2020. Skill Lync. Disponível em: <https://skill-lync.freshdesk.com/support/solutions/articles/43000560114-conservation-vs-non-conservation-forms-of-governing-equations>. Acesso em: 19 fev. 2021.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. **Um Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos (Guia PMBOK).** 5a. ed. Newtown Square, Pennsylvania, Project Management Institute (PMI), 2013.

RAGHEB, M., RAGHEB, A. M., "Wind Turbines Theory - The Betz Equation and

Optimal Rotor Tip Speed Ratio". **Fundamental and Advanced Topics in Wind Power**, [S.l.], InTech, 2011. p. 20–38. DOI: 10.5772/21398. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/fundamental-and-advanced-topics-in-wind-power/wind-turbines-theory-the-betz-equation-and-optimal-rotor-tip-speed-ratio>.

RAI, A. "Technical Challenges in Microgrid", **International Journal of Psychosocial Rehabilitation**, v. 24, n. 5, p. 3440–3447, 2020. DOI: 10.37200/ijpr/v24i5/pr202054. .

RAJAKOVIC, Nikola. "Energy Transition - 3D array is key for tracking trends (part two)". **Balkan Green Energy News**, 27 abr. 2020. Disponível em: <https://balkangreenenergynews.com/energy-transition-3d-array-is-key-for-tracking-trends/>. Acesso em: 20 set. 2020.

RAMADAN, A., NAWAR, M. A. A., MOHAMED, M. H. "Performance evaluation of a drag hydro kinetic turbine for rivers current energy extraction - A case study", **Ocean Engineering**, v. 195, p. 106699, 1 jan. 2020. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106699. .

REID, Gerard. "The 3D's and what they mean for the worlds of energy and transport". **Energy and Carbon**, 19 jun. 2017. Disponível em: <https://energyandcarbon.com/3ds-mean-worlds-energy-transport/>. Acesso em: 29 set. 2020.

REZEK, T. J. **Metodologia de Projeto Hidrodinâmico de Turbinas Hidrocinéticas Carenadas Baseada na Otimização e Simulação em Dinâmica dos Fluidos Computacional**. 2019. 107 f. Universidade Federal de Itajubá - Unifei, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/2020>. Acesso em: 10 fev. 2021.

RITCHIE, H. **Who has contributed most to the global CO2 emissions**. 2019. Our World In Data. Disponível em: <https://ourworldindata.org/contributed-most-global-co2>. Acesso em: 7 out. 2020.

RODRIGUES, A. L. **Estudo do Ganho de Rendimento de uma Turbina Hidráulica de Fluxo Reversível do tipo Wells Dotada de Sistema Diretor de Pás Fixas, aplicada em Centrais Maremotrizes**. 2019. 126 f. Universidade Federal de Itajubá - Unifei, 2019.

ROSE, A. De, BUNA, M., STRAZZA, C., *et al.* **Project Technology Readiness Level: Guidance Principles for Renewable Energy technologies Final Report**. . Luxembourg, European Commission, 2017. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d5d8e9c8-e6d3-11e7-9749-01aa75ed71a1>.

ROY, A., BANDYOPADHYAY, S. "Wind Power Based Isolated Energy Systems", **Wind Power Based Isolated Energy Systems**, n. Zhang 2010, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-00542-9. .

RUNGE, S., STOESSER, T., MORRIS, E., *et al.* "Technology Readiness of a Vertical-

Axis Hydro-Kinetic Turbine", **Journal of Power and Energy Engineering**, v. 06, n. 08, p. 63–85, 2018. DOI: 10.4236/jpee.2018.68004. .

SANTOS, M. **Metamorfoses do Espaço Habitado: fundamentos teóricos e metodológicos da Geografia**. 6. ed. São Paulo, Edusp, 2014.

SCHUMPETER, J. A. **Teoria do Desenvolvimento Econômico: uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico**. 1. ed. São Paulo, Nova Cultural, 1997. v. 252.

SCHWAB, K. **A Quarta Revolução Industrial**. 1. ed. São Paulo, Edipro, 2019.

SEN, A. **Desenvolvimento como Liberdade**. 1. ed. São Paulo, Companhia das Letras, 2010.

SILVA, P. A. S. F., DE OLIVEIRA, T. F., BRASIL JUNIOR, A. C. P., *et al.* "Numerical study of wake characteristics in a horizontal-axis hydrokinetic turbine", **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 88, n. 4, p. 2441–2456, 2016. DOI: 10.1590/0001-3765201620150652. .

SIMEC ATLANTIS ENERGY. **MeyGen**. 2020. Tidal Stream Projects. Disponível em: <https://simecatlantis.com/projects/meygen/>. Acesso em: 3 nov. 2020.

SOLOMON, B. D., KRISHNA, K. "The coming sustainable energy transition: History, strategies, and outlook", **Energy Policy**, v. 39, n. 11, p. 7422–7431, 2011. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.09.009. .

SOOD, M., SINGAL, S. K. "Development of hydrokinetic energy technology: A review", **International Journal of Energy Research**, v. 43, n. 11, p. 5552–5571, 2019. DOI: 10.1002/er.4529. .

SOUZA, J. F. A. de, OLIVEIRA, L. R., DE AZEVEDO DE, J. L. L., *et al.* "Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem", **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 1, p. 21–41, 2011. DOI: 10.1590/S0102-261X2011000100002. .

SULE, L., MOCHTAR, A. A., JALALUDDIN. "Performance of a 90°-Bent Bladed Vertical Axis Wind Turbine Model with Various Numbers of Blades", **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 619, p. 012052, 25 out. 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/619/1/012052. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/619/1/012052>.

TAMPIER, G., TRONCOSO, C., ZILIC, F. "Numerical analysis of a diffuser-augmented hydrokinetic turbine", **Ocean Engineering**, v. 145, n. September, p. 138–147, 2017. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.09.004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.09.004>.

TÁVARA, D. I. M. **Estudo Numérico de Jato Circular Espiralado Incidente em uma Placa Aquecida**. 2011. 211 f. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.18103>. Acesso em: 3 fev. 2021.

TIAGO FILHO, G. L., SOUZA, Z. de, ROSSI, C. A. B. de, *et al.* "“Poraque” hydrokinetic turbine", **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 12, 1 ago. 2010. DOI: 10.1088/1755-1315/12/1/012094. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/12/1/012094>.

TIWARI, G., KUMAR, J., PRASAD, V., *et al.* "Utility of CFD in the design and performance analysis of hydraulic turbines — A review", **Energy Reports**, v. 6, p. 2410–2429, 2020. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.09.004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.09.004>.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME - UNDP. **World Energy Assessment: Energy and the challenge of sustainability**. . New York, UNDP, 2000. Disponível em: [https://www.undp.org/content/undp/en/home/librarypage/environment-energy/sustainable\\_energy/world\\_energy\\_assessmentenergyandthechallengeofsustainability.html](https://www.undp.org/content/undp/en/home/librarypage/environment-energy/sustainable_energy/world_energy_assessmentenergyandthechallengeofsustainability.html).

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Technology readiness assessment guide**. . Washington, U.S. Department of Energy, 2015. Disponível em: [www.directives.doe.gov](http://www.directives.doe.gov).

VALAVANIDIS, A., VLACHOGIANNI, T. "Homo sapiens' energy dependence and use throughout human history and evolution", **Chem-Tox-Ecotox.Org**, n. December, p. 1–32, 2013. Disponível em: [http://chem-tox-ecotox.org/wp/wp-content/uploads/2013/12/ENERGY-HUMANSOCIETY-DEVELOP-ENVIRON-2012\\_revised.pdf](http://chem-tox-ecotox.org/wp/wp-content/uploads/2013/12/ENERGY-HUMANSOCIETY-DEVELOP-ENVIRON-2012_revised.pdf).

VAN VEELLEN, B., VAN DER HORST, D. "What is energy democracy? Connecting social science energy research and political theory.", **Energy Research and Social Science**, v. 46, n. February, p. 19–28, 2018. DOI: 10.1016/j.erss.2018.06.010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.06.010>.

VANZWIETEN, J., MCANALLY, W., AHMAD, J., *et al.* "In-stream hydrokinetic power: Review and appraisal", **Journal of Energy Engineering**, v. 141, n. 3, p. 1–16, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000197. .

VERMAAK, H. J., KUSAKANA, K., KOKO, S. P. "Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 625–633, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.066. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.066>.

VIRGINIA. **Virginia Clean Economy Act**. Electric utility regulation; environmental goals, United States, 2020. Disponível em: <https://lis.virginia.gov/cgi-bin/legp604.exe?201+sum+HB1526>. Acesso em: 7 out. 2020.

WANG, J., LIU, Y., CHEN, L., *et al.* "Using the technology readiness levels to support technology management in the special funds for marine renewable energy", **OCEANS 2016 - Shanghai**, 2016. DOI: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485608. .

WANG, J., WANG, H., LIU, Y., *et al.* "The development of marine renewable energy in China: Prospects, challenges and recommendations". 2018. **Anais [...]** Sanya, China, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 121, 2018. DOI: 10.1088/1755-1315/121/5/052079. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/volume/1755-1315/121>.

WANG, W. Q., SONG, K., YAN, Y. "Influence of interaction between the diffuser and rotor on energy harvesting performance of a micro-diffuser-augmented hydrokinetic turbine", **Ocean Engineering**, v. 189, n. August, p. 1–10, 2019. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106293. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106293>.

WENEHUBUN, F., SAPUTRA, A., SUTANTO, H. "An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades", **Energy Procedia**, v. 68, p. 297–304, 2015. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.03.259. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.259>.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. Porto Alegre, AMGH, 2011.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. **Historical GHG Emissions**. 2019. Climate Analysis Indicators Tool - Climate Watch. Disponível em: [https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&calculation=ABSOLUTE\\_VALUE&chartType=percentage&end\\_year=2016&sectors=total-excluding-lucf&source=CAIT&start\\_year=1990](https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&calculation=ABSOLUTE_VALUE&chartType=percentage&end_year=2016&sectors=total-excluding-lucf&source=CAIT&start_year=1990). Acesso em: 6 out. 2020.

YUCE, M. I., MURATOGLU, A. "Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 72–82, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2014.10.037. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.037>.

ZEYRINGER, M., FAIS, B., KEPPO, I., *et al.* "The potential of marine energy technologies in the UK – Evaluation from a systems perspective", **Renewable Energy**, v. 115, p. 1281–1293, 2018. DOI: 10.1016/j.renene.2017.07.092. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.092>.

ZHAO, H., KANG, C., DING, K., *et al.* "Transient startup characteristics of a drag-type

hydrokinetic turbine rotor", **Energy Conversion and Management**, v. 223, n. July, p. 113287, 1 nov. 2020. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113287. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113287>. Acesso em: 3 abr. 2021.



## APÊNDICE A LIMITE DE BETZ

A seguir é demonstrado o cálculo do limite de Betz (MANWELL, MCGOWAN, *et al.*, 2009, WHITE, 2011), que considera o caso ideal. Para o estudo, define-se os volumes de controle ( $VC_I$  e  $VC_{II}$ ) apresentados na Figura A. 1, sendo que o  $VC_{II}$  contém o disco atuador que representa a turbina cinética.

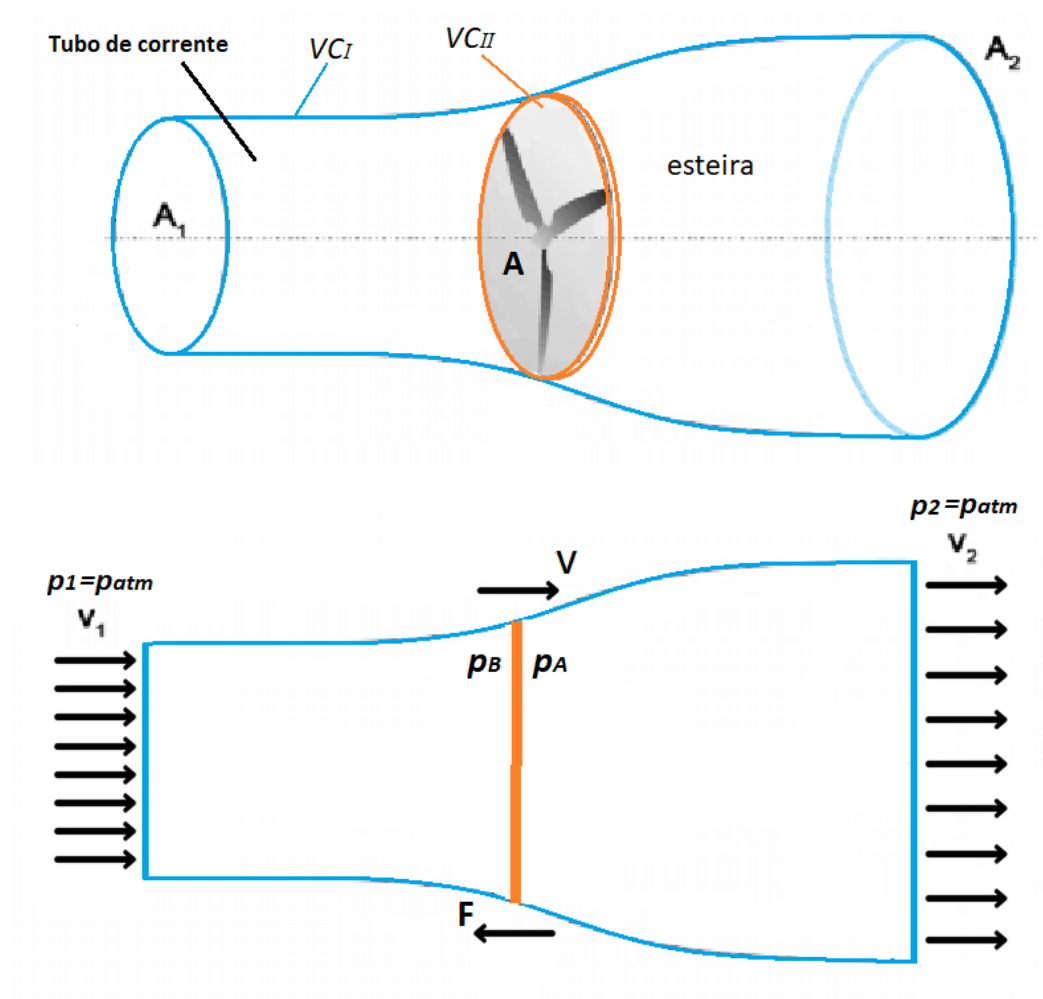


Figura A. 1: Representação dos volumes de controle considerados para cálculo do número de Betz

As seguintes hipóteses simplificadoras são consideradas para os cálculos: escoamento permanente, incompressível, uniforme para cada seção transversal e unidirecional na direção  $x$ ; viscosidade nula; número infinito de pás; pressão em 1 ( $p_1$ ) é igual à pressão em 2 ( $p_2$ ) que é igual a pressão atmosférica local ( $p_{atm}$ ). O cálculo supõe ainda uma descontinuidade de pressão no  $VC_{II}$ , conforme é identificado na Figura A. 2.

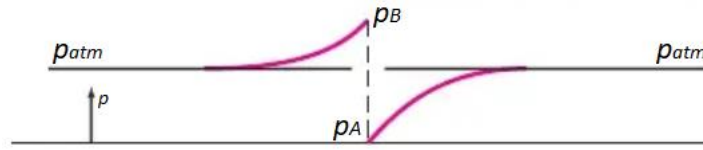


Figura A. 2: Distribuição de pressões ao longo do tubo de corrente, a descontinuidade nas pressões ocorre no VC<sub>II</sub>

Fonte: White (2011, p. 807) adaptado

A equação (A. 1), a seguir é a equação da quantidade de movimento.

$$\sum \vec{F} = \frac{d(m \cdot \vec{v})}{dt} \quad (\text{A. 1})$$

Chega-se na equação (A. 2) para o VC<sub>1</sub>

$$\sum F_x = -F = \dot{m} \cdot (v_2 - v_1) \quad (\text{A. 2})$$

Considerando o VC<sub>2</sub>, obtém-se (A. 3)

$$\sum F_x = -F + (p_B - p_A) \cdot A = \dot{m} \cdot (v_A - v_B) = 0 \quad (\text{A. 3})$$

A potência, P, é obtida pela equação (A. 4) e a vazão mássica,  $\dot{m}$ , é dada pela equação (A. 5).

$$P = F \cdot v \quad (\text{A. 4})$$

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v = \text{constante} \quad (\text{A. 5})$$

Assim, de (A. 2), (A. 4) e (A. 5), chega-se em

$$P = \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_2 - v_1) \cdot v = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_2 - v_1) \quad (\text{A. 6})$$

Para obter a relação entre v, v<sub>1</sub> e v<sub>2</sub>, primeiro aplicamos a equação de Bernoulli, sem variação de altura, entre os pontos 1 e B e entre os pontos A e 2, obtendo (A. 7).

$$p_{atm} + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 = p_B + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2$$

$$p_A + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 = p_{atm} + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2$$

$$\therefore p_B - p_A = \frac{1}{2} \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (\text{A. 7})$$

Substituindo  $(p_B - p_A)$  da equação (A. 7) na equação (A. 3) e depois F em (A. 2), obtemos

$$\begin{aligned}
 A \cdot \left[ \frac{1}{2} \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2) \right] &= F = \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \\
 \therefore \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2} &= v \cdot (v_1 - v_2) \\
 v &= \frac{(v_1 + v_2)}{2}
 \end{aligned} \tag{A. 8}$$

Substituindo (A. 8) em (A. 6), obtemos

$$\begin{aligned}
 P &= \rho \cdot A \cdot \left( \frac{v_1 + v_2}{2} \right)^2 \cdot (v_2 - v_1) \\
 &= \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2)
 \end{aligned} \tag{A. 9}$$

A equação (A. 9) é a potência teórica da turbina considerando as simplificações citadas. Para obtenção da potência máxima operada por essa máquina ideal a uma velocidade  $V_1$ , derivamos P em relação a  $V_2$  e igualamos a zero.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial P}{\partial v_2} &= 0 \\
 \therefore v_2 &= \frac{1}{3} \cdot v_1
 \end{aligned} \tag{A. 10}$$

Substituindo (A. 10) em (A. 9)

$$\begin{aligned}
 P_{e\text{máx ideal}} &= \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot \left[ v_1^2 - \left( \frac{1}{3} \cdot v_1 \right)^2 \right] \cdot \left( v_1 + \frac{1}{3} \cdot v_1 \right) \\
 &= \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3
 \end{aligned} \tag{A. 11}$$

Da equação (2.3), apresentada na página 42 desse trabalho, considerando a potência disponível na área A do disco atuador, calcula-se por fim o Coeficiente de potência máximo para o caso ideal,  $Cp_{\text{máx}}$

$$\begin{aligned}
 Cp_{\text{máx}} &= \frac{P_{e\text{máx ideal}}}{P_{\text{disp}}} = \frac{\frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3} \\
 \therefore Cp_{\text{máx}} &= \frac{16}{27} \cong 0,593 \quad \blacksquare
 \end{aligned} \tag{A. 12}$$

## APÊNDICE B

### RESULTADOS NUMÉRICOS – COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO

Os resultados apresentados nesse apêndice foram obtidos para:

- Sentido de projeto: velocidade de escoamento de 2 m/s, rotação de 151 rpm.
- Sentido reverso: velocidade de escoamento de 2 m/s, rotação de 125 rpm.

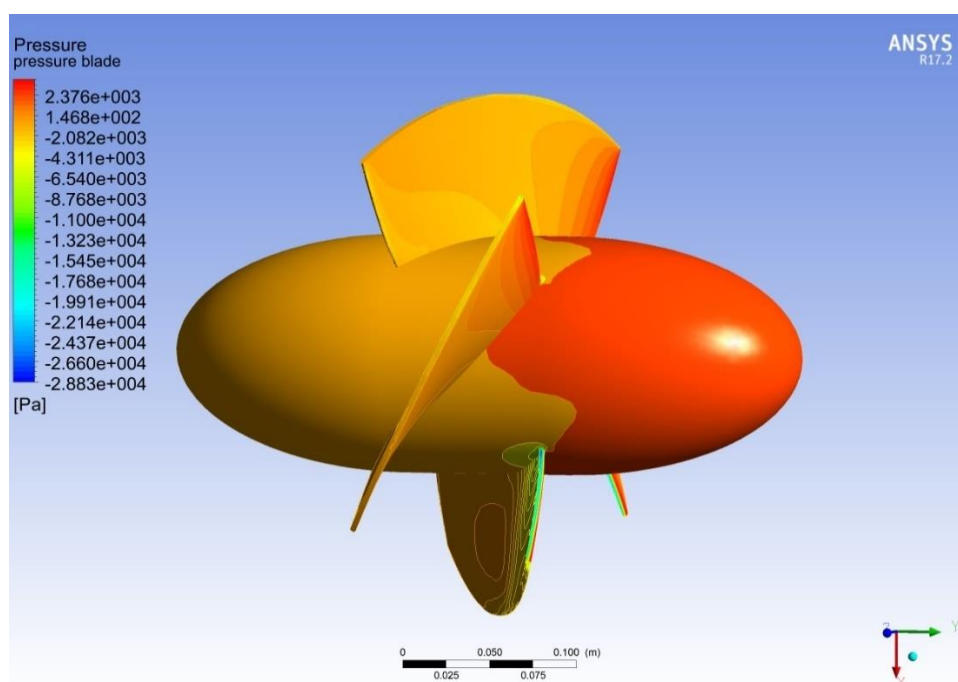
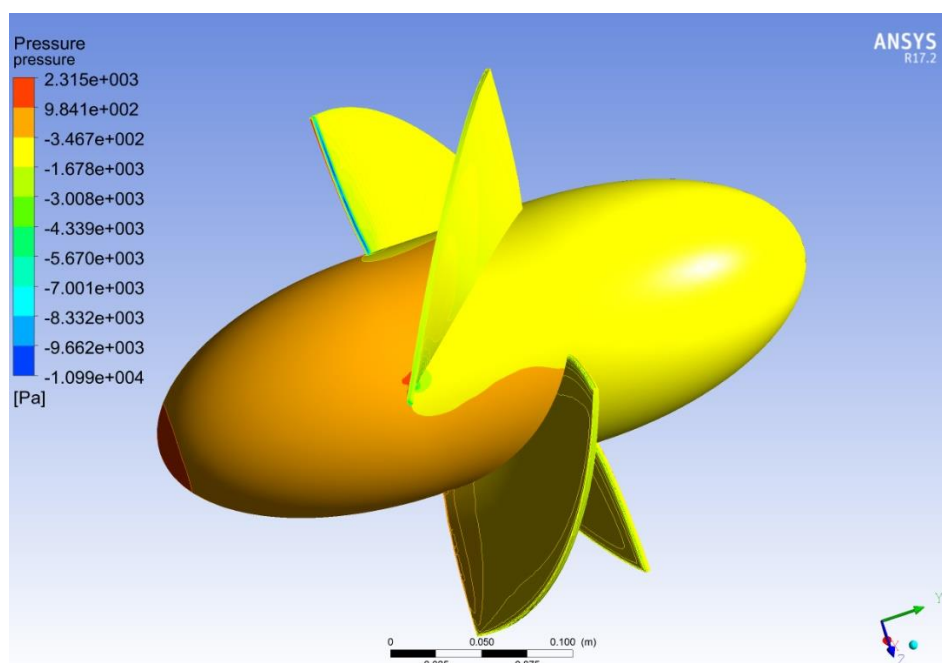


Figura A. 3: Contornos de pressão (a) sentido de projeto; (b) sentido oposto  
Fonte: Elaboração própria

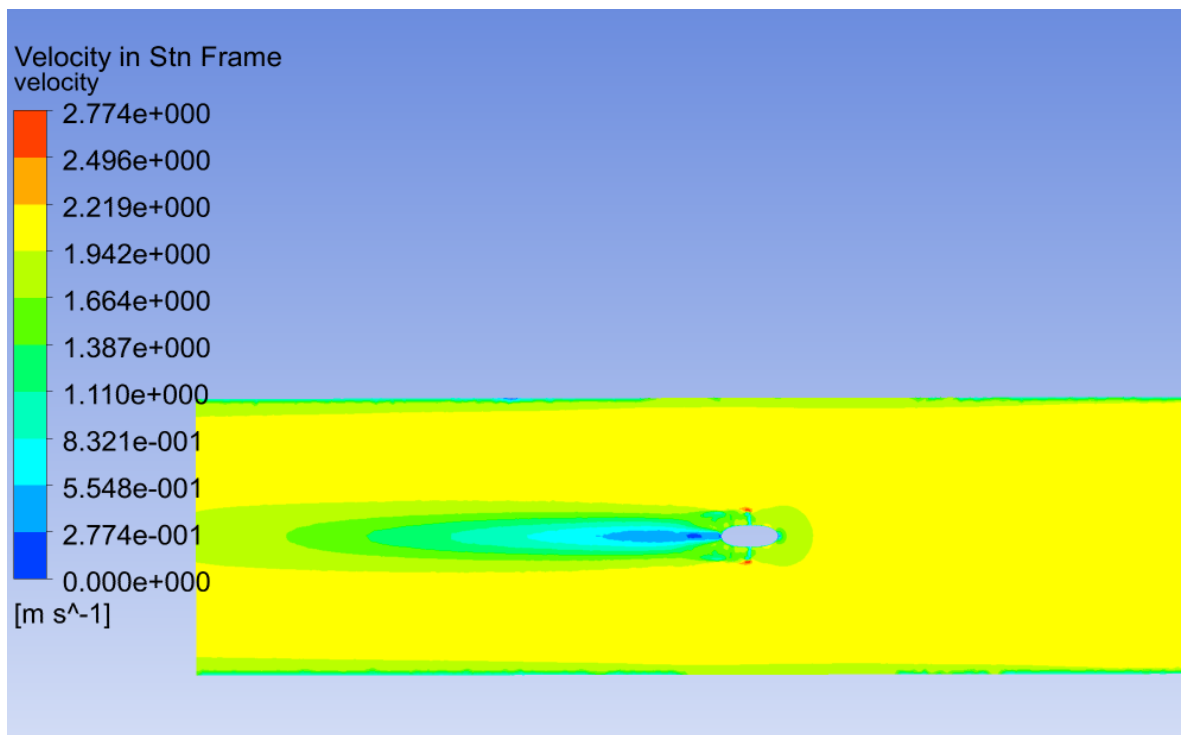
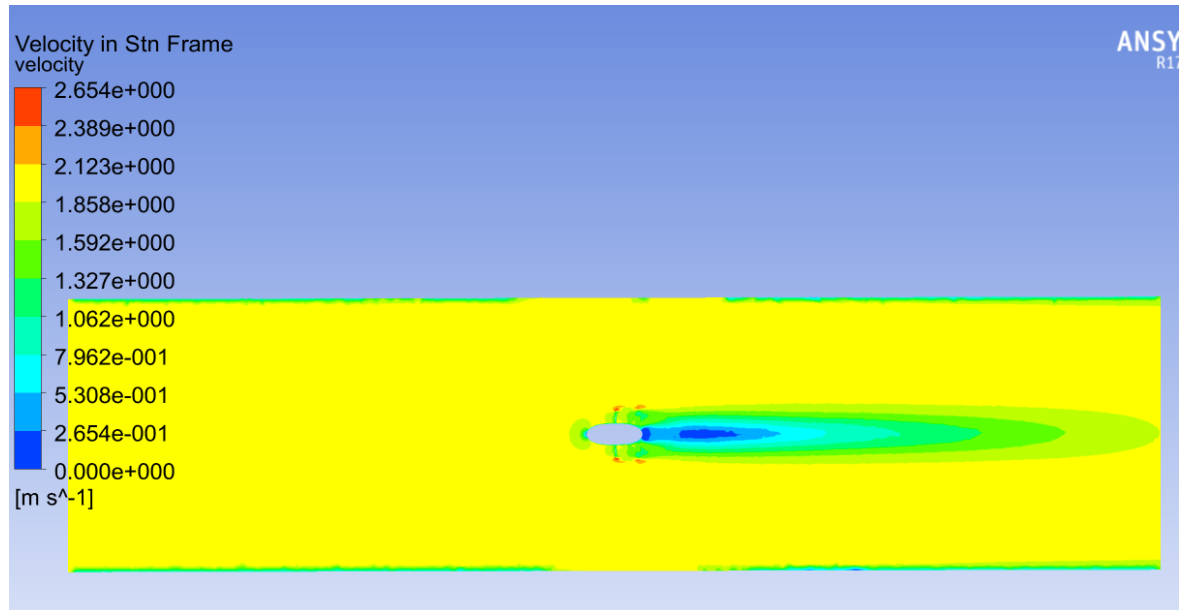
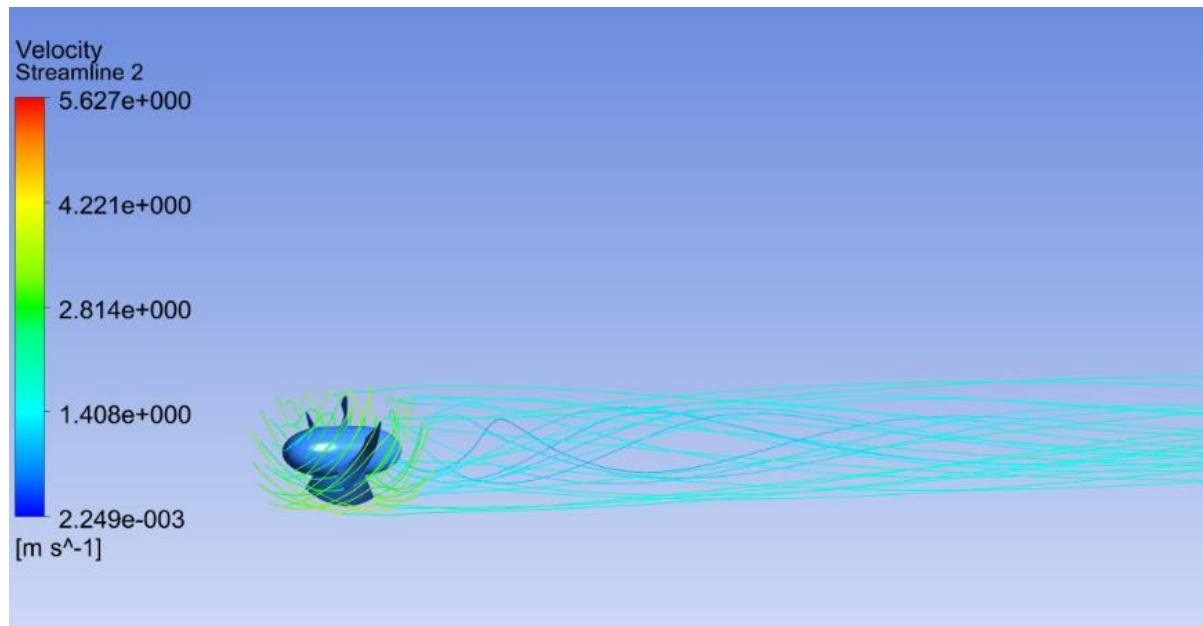
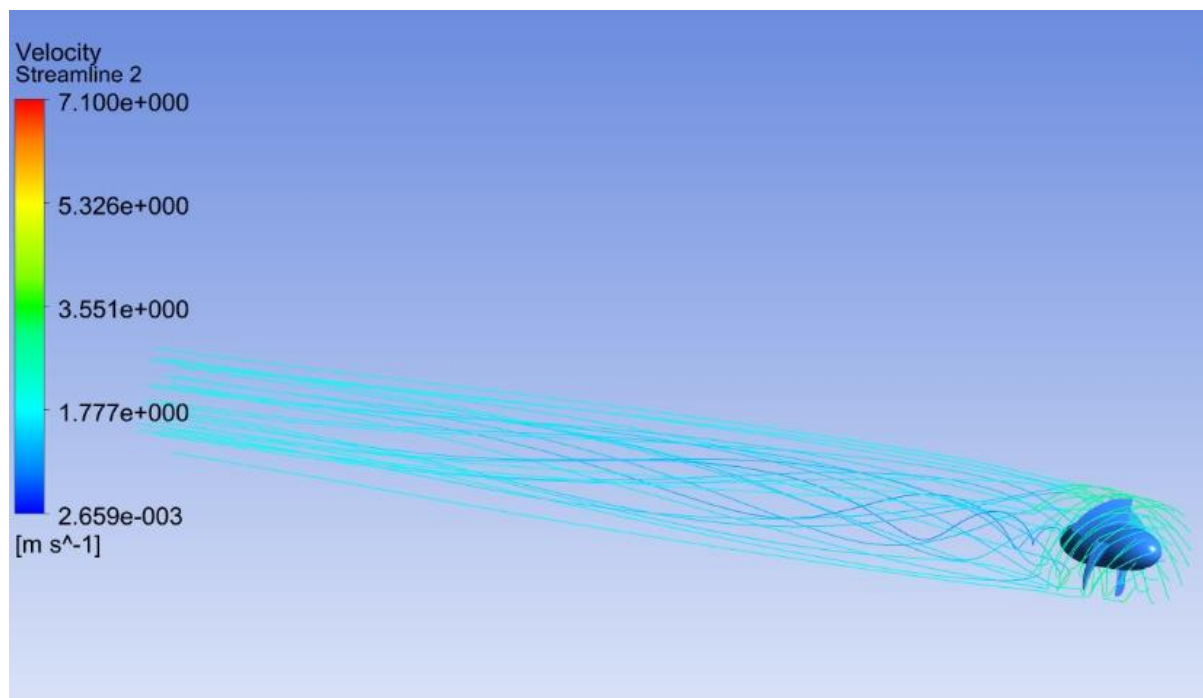


Figura A. 4: Contornos de velocidade no plano XY para (a) sentido de projeto, (b) sentido oposto  
Fonte: Elaboração própria



(a)



(b)

Figura A. 5: Linhas de corrente de velocidade de escoamento a partir da entrada do rotor (a) sentido de projeto; (b) sentido oposto  
Fonte: Elaboração própria

## ANEXO A

### TABELAS DO IBGE: ACESSO À ELETRICIDADE

Os dados do censo de 2000 do IBGE com relação ao acesso à luz elétrica são apresentados na Tabela A. 1, a seguir.

Tabela A. 1: Acesso à eletricidade nos domicílios no ano 2000

Grandes Regiões e Unidades da Federação	Domicílios particulares permanentes	Presença de iluminação elétrica
<b>Brasil</b>	<b>44 776 736</b>	<b>42 331 817</b>
<b>Norte</b>	<b>2 808 804</b>	<b>2 290 675</b>
Rondônia	347 192	294 327
Acre	129 392	102 163
Amazonas	570 562	483 378
Roraima	74 402	64 736
Pará	1 308 511	1 034 076
Amapá	98 521	93 745
Tocantins	280 224	218 250
<b>Nordeste</b>	<b>11 398 077</b>	<b>9 996 237</b>
Maranhão	1 235 523	985 238
Piauí	661 105	502 106
Ceará	1 757 249	1 568 648
Rio Grande do Norte	671 581	633 752
Paraíba	848 972	805 558
Pernambuco	1 968 316	1 890 531
Alagoas	649 347	590 319
Sergipe	436 717	403 652
Bahia	3 169 267	2 616 433
<b>Sudeste</b>	<b>20 215 396</b>	<b>19 967 332</b>
Minas Gerais	4 763 314	4 581 898
Espírito Santo	840 842	830 313
Rio de Janeiro	4 252 642	4 233 617
São Paulo	10 358 598	10 321 504
<b>Sul</b>	<b>7 201 178</b>	<b>7 057 199</b>
Paraná	2 663 037	2 606 241
Santa Catarina	1 498 071	1 478 061
Rio Grande do Sul	3 040 070	2 972 897
<b>Centro-Oeste</b>	<b>3 153 281</b>	<b>3 020 374</b>
Mato Grosso do Sul	562 769	538 506
Mato Grosso	645 584	578 473
Goiás	1 397 463	1 357 686
Distrito Federal	547 465	545 709

Fonte: IBGE (2000)

Os dados do censo de 2010 do IBGE com relação ao acesso à luz elétrica são apresentados na Tabela A. 2, a seguir.

Tabela A. 2: Acesso à eletricidade nos domicílios no ano 2010

Grandes Regiões e Unidades da Federação	Domicílios particulares permanentes				
	Total	Existência de energia elétrica			
		Tinham			Não tinham
		Total	De companhia distribuidora	De outra fonte	
<b>Brasil</b>	<b>57 324 185</b>	<b>56 595 007</b>	<b>56 044 395</b>	<b>550 612</b>	<b>728 512</b>
<b>Norte</b>	<b>3 975 533</b>	<b>3 724 295</b>	<b>3 547 426</b>	<b>176 869</b>	<b>251 207</b>
Rondônia	455 599	442 296	438 920	3 376	13 300
Acre	190 645	177 844	173 751	4 093	12 796
Amazonas	799 629	746 336	691 828	54 508	53 290
Roraima	115 844	106 779	103 942	2 837	9 065
Pará	1 859 165	1 720 875	1 615 055	105 820	138 270
Amapá	156 284	153 643	149 306	4 337	2 641
Tocantins	398 367	376 522	374 624	1 898	21 845
<b>Nordeste</b>	<b>14 922 901</b>	<b>14 583 662</b>	<b>14 460 942</b>	<b>122 720</b>	<b>339 087</b>
Maranhão	1 653 701	1 590 020	1 578 969	11 051	63 673
Piauí	848 263	789 771	784 509	5 262	58 491
Ceará	2 365 276	2 340 224	2 331 412	8 812	25 045
Rio Grande do Norte	899 513	892 561	888 123	4 438	6 952
Paraíba	1 080 672	1 072 541	1 068 728	3 813	8 121
Pernambuco	2 546 872	2 531 369	2 511 190	20 179	15 495
Alagoas	842 884	833 428	825 550	7 878	9 456
Sergipe	591 315	585 501	582 223	3 278	5 807
Bahia	4 094 405	3 948 247	3 890 238	58 009	146 047
<b>Sudeste</b>	<b>25 199 799</b>	<b>25 133 234</b>	<b>24 937 720</b>	<b>195 514</b>	<b>66 211</b>
Minas Gerais	6 028 223	5 985 375	5 968 265	17 110	42 819
Espírito Santo	1 101 394	1 098 905	1 094 466	4 439	2 488
Rio de Janeiro	5 243 029	5 237 077	5 171 371	65 706	5 892
São Paulo	12 827 153	12 811 877	12 703 618	108 259	15 012
<b>Sul</b>	<b>8 891 279</b>	<b>8 859 224</b>	<b>8 829 870</b>	<b>29 354</b>	<b>31 979</b>
Paraná	3 298 578	3 283 914	3 271 898	12 016	14 656
Santa Catarina	1 993 097	1 988 625	1 983 848	4 777	4 455
Rio Grande do Sul	3 599 604	3 586 685	3 574 124	12 561	12 868
<b>Centro-Oeste</b>	<b>4 334 673</b>	<b>4 294 592</b>	<b>4 268 437</b>	<b>26 155</b>	<b>40 028</b>
Mato Grosso do Sul	759 299	749 165	745 823	3 342	10 133
Mato Grosso	915 089	898 399	887 440	10 959	16 659
Goiás	1 886 264	1 873 709	1 870 552	3 157	12 544
Distrito Federal	774 021	773 319	764 622	8 697	692

Fonte: IBGE (2010).



## ANEXO B

### DADOS DE PROJETO DO ROTOR COM PÁS CURVO-TORCIONADAS

A Tabela A. 3 apresenta dados de projeto, a indicação de I a XX são referentes aos procedimentos de projeto adotados por Bolaños (2015). Os procedimentos utilizados foram adequados pelo autor para esse caso, a partir da literatura para turbinas axiais convencionais.

Tabela A. 3: Dados de projeto - rotor de pás curvo-torcionadas

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Estação	$D_{\text{estação}}$	$u$	$\Delta C_u$	$\alpha_6$	$w_\infty$	$\beta_\infty$	$C_s \cdot \frac{l}{t}$	<i>passo</i>	$l$	$\frac{l}{t}$
	[m]	[m/s]	[m/s]	[graus]	[m/s]	[graus]	[-]	[m]	[m]	[-]
<b>Cubo</b>	0,137	1,286	0,467	107,29	2,14	44,63	0,437	0,108	0,126	1,164
<b>2</b>	0,154	1,438	0,417	105,55	2,23	42,32	0,375	0,121	0,135	1,121
<b>3</b>	0,170	1,590	0,378	104,13	2,33	40,13	0,324	0,133	0,145	1,084
<b>4</b>	0,186	1,743	0,345	102,94	2,43	38,07	0,283	0,146	0,154	1,053
<b>5</b>	0,202	1,895	0,317	101,93	2,54	36,15	0,249	0,159	0,163	1,026
<b>6</b>	0,219	2,047	0,293	101,06	2,66	34,36	0,221	0,172	0,172	1,004
<b>7</b>	0,235	2,199	0,273	100,32	2,78	32,71	0,197	0,185	0,182	0,985
<b>8</b>	0,251	2,351	0,255	99,66	2,90	31,18	0,176	0,197	0,191	0,968
<b>9</b>	0,267	2,503	0,240	99,08	3,02	29,76	0,159	0,210	0,201	0,954
<b>10</b>	0,284	2,656	0,226	98,57	3,15	28,45	0,144	0,223	0,210	0,942
<b>Ponta</b>	0,300	2,808	0,214	98,11	3,28	27,23	0,130	0,236	0,220	0,932
	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII		
Estação	$C_s$	$\delta$	$\frac{l}{r_a}$	$r_a$	$\frac{f}{l}$	$f$	$\beta$	$Re_c$		
	[-]	[graus]	[-]	[m]	[-]	[-]	[graus]	[-]		
<b>Cubo</b>	0,376	0	0,380	330,6	0,048	6,0	44,63	267.248,5		
<b>2</b>	0,334	0	0,346	390,5	0,043	5,9	42,32	300.148,5		
<b>3</b>	0,299	0	0,318	455,3	0,040	5,7	40,13	335.282,9		
<b>4</b>	0,269	0	0,291	528,4	0,036	5,6	38,07	372.920,8		
<b>5</b>	0,243	0	0,267	610,5	0,033	5,5	36,15	413.247,6		
<b>6</b>	0,220	0	0,246	702,1	0,031	5,3	34,36	456.393,2		
<b>7</b>	0,200	0	0,226	803,2	0,028	5,1	32,71	502.450,3		
<b>8</b>	0,182	0	0,209	913,0	0,026	5,0	31,18	551.485,8		
<b>9</b>	0,166	0	0,195	1029,9	0,024	4,9	29,76	603.549,2		
<b>10</b>	0,152	0	0,182	1151,0	0,023	4,8	28,45	658.677,4		
<b>Ponta</b>	0,140	0	0,171	1284,4	0,021	4,7	27,23	716.898,5		

Fonte: Bolaños (2015) adaptado

O Quadro A.1 apresenta a nomenclatura utilizada, para facilitar a consulta.

Quadro A. 1: Nomenclatura dos parâmetros de projeto do rotor de pás curvo-torcionadas

Símbolo	Descrição	Símbolo	Descrição
$D_{\text{estação}}$	Diâmetro referente à estação de projeto	<i>passo</i>	Passo da pá, considerando o número de pás do projeto
$u$	Velocidade circunferencial	$\delta$	Ângulo de ataque
$\Delta C_u$	Projeção da velocidade absoluta na saída ( $C_6$ ) sobre a direção da velocidade circunferencial ( $u$ )	$r_a$	Raio da pá, ver Figura A.7
$\alpha_6$	Ângulo de saída formado entre os vetores $C_6$ e $U$	$f$	Arqueamento, ver Figura A.7
$w_\infty$	Velocidade relativa média	$Re_c$	Número de Reynolds com base na corda
$\beta_\infty / \beta$	Ângulo entre $w_\infty$ e $U$	$l$	Corda, ver Figura A.7
$C_s$	Coeficiente de sustentação		

Fonte: dados de Bolaños (2015)

A Figura A. 6 apresenta nomenclaturas pertinentes.

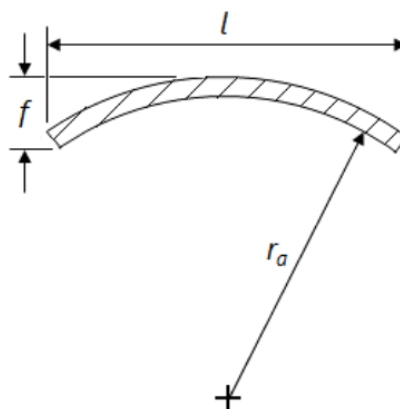


Figura A. 6: definição da simbologia para o perfil em chapa circular considerado para projeto da pá  
Fonte: Bolaños (2015)

Os cálculos utilizados para obtenção dos valores apresentados na Tabela A. 3 podem ser consultados em Bolaños (2015), para desenho das pás do rotor utilizado no presente trabalho, os dados aqui apresentados são suficientes. Considera-se ainda relação de cubo igual a 0,458, portanto o diâmetro interno considerado é de 0,137 m. A ogiva foi traçada a partir de elipsoides, sem otimização específica, as dimensões dos elipsoides são apresentadas na Figura A. 7.

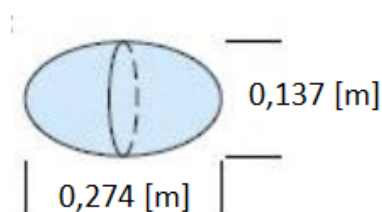


Figura A. 7: Dimensões para construção da ogiva considerada no projeto  
Fonte: Bolaños (2015) adaptado

## ANEXO C

### PRINCIPAIS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DO ROTOR DE PÁS CURVO-TORCIONADAS

Aqui são apresentados resultados de interesse obtidos por Bolaños (2015). São apresentados apenas os resultados para um único rotor, tanto para o caso de pás planas quanto para o caso de rotor com pás curvo-torcionadas.

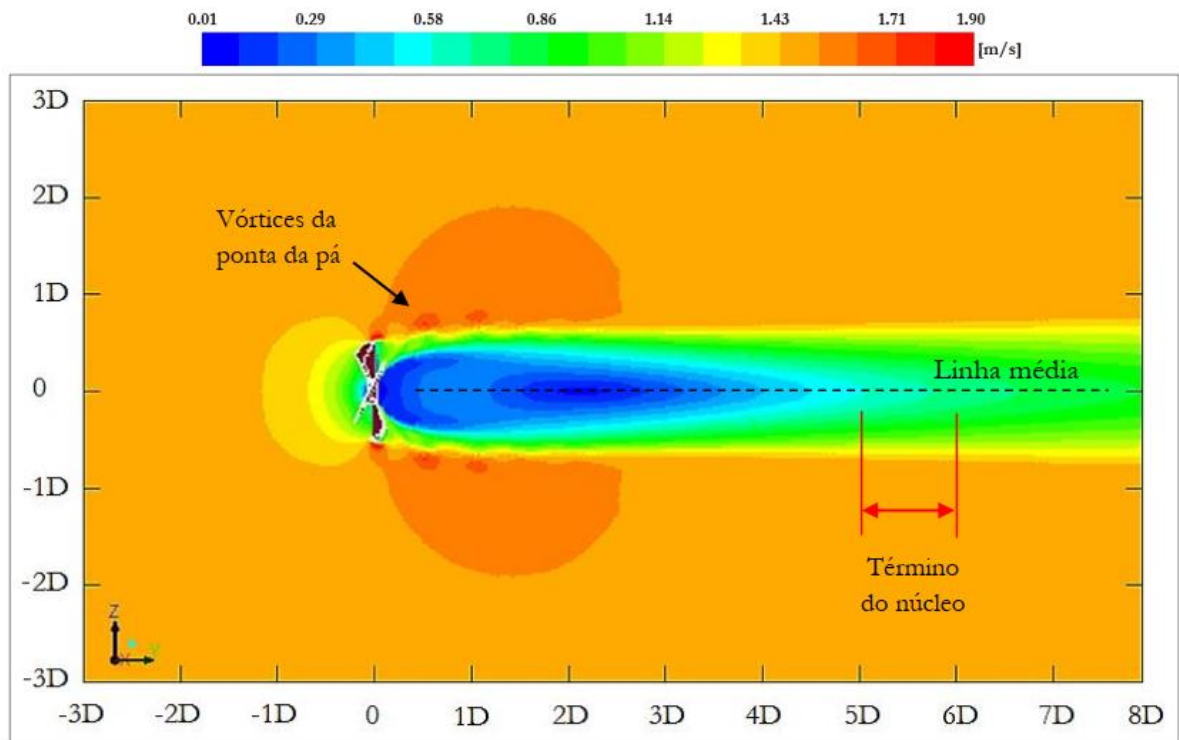
A Tabela A. 4 apresenta os valores de razão de velocidade na ponta da pá ( $\lambda$ ), rotação ( $n$ ), potência ( $P$ ) e densidade de potência ( $D_P$ ), para os valores máximos de Coeficiente de potência ( $C_p$ ) encontrados nas simulações das quatro velocidades consideradas. São apresentados os valores encontrados nas simulações do rotor de pás planas e do rotor de pás curvo-torcionadas.

Tabela A. 4: Valores de interesse para os pontos de maior  $C_p$ . Para os casos de pás planas e pás curvo-torcionadas

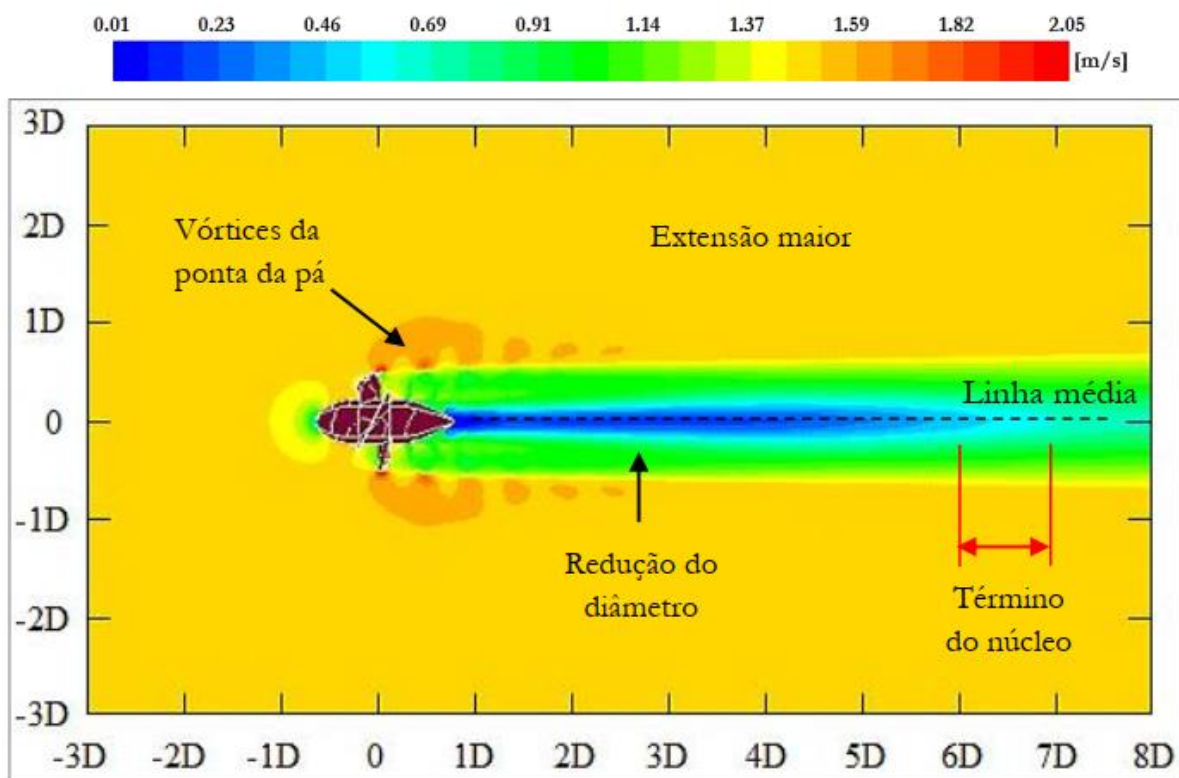
	<b>Velocidade</b> [m/s]	<b><math>C_p</math></b> [%]	<b><math>\lambda</math></b> [-]	<b><math>n</math></b> [rpm]	<b><math>P</math></b> [W]	<b><math>D_P</math></b> [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Pá plana</b>	1,17	21,36	1,214	90,41	12,07	175,75
	1,50	21,47	1,202	114,81	25,57	361,68
	1,75	21,43	1,211	134,93	40,58	574,16
	2,00	21,39	1,187	151,13	60,78	859,86
<b>Pá curvo-torcionada</b>	1,17	31,41	1,219	90,80	17,75	251,08
	1,50	31,60	1,215	116,03	37,63	532,37
	1,75	31,56	1,191	132,64	59,67	844,17
	2,00	31,54	1,192	151,80	89,02	1259,33

Fonte: dados de Bolaños (2015)

A Figura A. 8 apresenta os contornos de velocidade no entorno do rotor para a velocidade incidente de 1,5 m/s para os dois casos de interesse (rotor com pá plana e rotor com pá curvo-torcionada).



(a)



(b)

Figura A. 8: Contornos de magnitude de velocidade no entorno do rotor para  $v=1,5$  m/s para os casos (a) rotor de pás planas (b) rotor de pás curvo-torcionadas  
 Fonte: Bolaños (2015)

A Figura A. 9 apresenta curvas comparativas entre os dois rotores, obtidas a partir da simulação numérica dos mesmos.

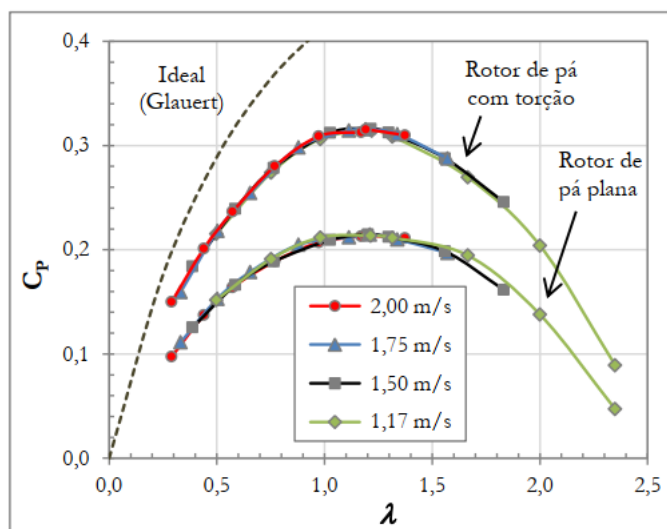


Figura A. 9: Curvas de coeficiente de potência por razão de velocidade da ponta da pá para rotor com pá plana e rotor com pá curvo-torcionada  
Fonte: Bolaños (2015)

Os resultados obtidos por Bolaños (2015), aqui apresentados foram os principais dados utilizados como base para o estudo desse trabalho. Algumas discussões que envolvem os resultados de Bolaños (2015) são realizadas na seção pertinente desse trabalho.