



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

RENATO AFONSO RIBEIRO

**ESTUDO SOBRE A EFICIÊNCIA DE UMA TURBINA HIDRÁULICA DE
VÓRTICE GRAVITACIONAL SUSTENTADO POR JATO**

ARAXÁ/MG

2023

RENATO AFONSO RIBEIRO

**ESTUDO SOBRE A EFICIÊNCIA DE UMA TURBINA HIDRÁULICA DE VÓRTICE
GRAVITACIONAL SUSTENTADO POR JATO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Automação Industrial, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Diego Alves de Moro
Martins

Coorientador: Prof. Dr. Horácio Albertini Neto

ARAXÁ/MG

2023



ATA Nº 91 / 2023 - DELMAX (11.57.05)

Nº do Protocolo: 23062.060618/2023-02

Araxá-MG, 11 de dezembro de 2023.

Ata de Defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Automação Industrial do Aluno Renato Afonso Ribeiro

Às quatorze horas do dia oito de dezembro de dois mil e vinte e três, reuniu-se, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG/ Campus Araxá, a Comissão Examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso para julgar, em exame final, o trabalho intitulado **ESTUDO SOBRE A EFICIÊNCIA DE UMA TURBINA HIDRÁULICA DE VÓRTICE GRAVITACIONAL SUSTENTADO POR JATO**, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Prof. Dr. Diego Alves de Moro Martins, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, concedeu a palavra ao candidato, **Renato Afonso Ribeiro**, para a exposição de seu trabalho. Após a apresentação, seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Ultimeada a arguição, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Após a reunião da Comissão Examinadora, o candidato foi considerado: **APROVADO**, obtendo nota final de: **85/100** (oitenta e cinco). O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. O aluno, abaixo assinado, declara que o trabalho ora identificado é da sua autoria material e intelectual, excetuando-se eventuais elementos, tais como passagens de texto, citações, figuras e datas, desde que devidamente identificada a fonte original. Declara ainda, neste âmbito, não violar direitos de terceiros. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou os trabalhos. O Prof. Leandro Resende Mattioli, responsável pela disciplina "Trabalho de Conclusão de Curso II", lavrou a presente ATA, que, após lida e aprovada, será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora e pelo candidato.

Araxá, 08 de dezembro de 2023.

Assinado eletronicamente por:

- Presidente e Orientador: Prof. Dr. Diego Alves de Moro Martins
- Coorientador: Prof. Dr. Horácio Albertini Neto
- Membro Titular: Prof. Dr. Admarço Vieira da Costa
- Membro Titular: Prof. Me. Alexandre Dias Linhares
- Professor da Disciplina TCC 2: Prof. Dr. Leandro Resende Mattioli
- Aluno: Renato Afonso Ribeiro

(Assinado digitalmente em 14/12/2023 11:30)
ADMARCO VIEIRA DA COSTA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matricula: 1073830

(Assinado digitalmente em 11/12/2023 13:28)
ALEXANDRE DIAS LINHARES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CTMECAX (11.50.19)
Matricula: 1164526

(Assinado digitalmente em 11/12/2023 13:37)
DIEGO ALVES DE MORO MARTINS
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matrícula: 3057864

(Assinado digitalmente em 13/12/2023 13:17)
HORACIO ALBERTINI NETO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matrícula: 1031357

(Assinado digitalmente em 11/12/2023 20:33)
LEANDRO RESENDE MATTIOLI
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matrícula: 2973183

(Assinado digitalmente em 12/12/2023 12:35)
RENATO AFONSO RIBEIRO
DISCENTE
Matrícula: 20193021781

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **91**, ano: **2023**, tipo: **ATA**, data de emissão: **11/12/2023** e o código de verificação: **edefedfc42**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e avós
por todo o apoio e carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CEFET/MG Araxá por sediar esse trabalho de pesquisa e disponibilizar os softwares da ANSYS, a qual também agradeço.

Agradeço ao Prof. Dr. Diego Alves de Moro Martins pela orientação e ao Prof. Dr. Horácio Albertini Neto pela disposição em colaborar com o estudo.

Agradeço a banca examinadora pelas correções e propostas.

Agradeço aos demais professores e servidores da instituição CEFET/MG pela colaboração.

Agradeço aos colegas pela parceria.

RESUMO

A necessidade de energia elétrica por toda parte do mundo é crescente e a busca por fontes de energia renováveis é a prioridade afim de reverter o efeito estufa causado pela quantidade de carbono já emitida para a atmosfera pelas fontes de combustíveis fósseis. As turbinas eólicas e os painéis fotovoltaicos têm se destacado como fontes renováveis alternativas a grandes hidroelétricas, e atendendo também a pequenos projetos para suprir uma necessidade local e/ou fornecer eletricidade para a rede. Entretanto, cabe destacar a intermitência das energias eólica e solar. Outra alternativa para atender a uma pequena demanda, a Turbina Hidráulica de Vórtice Gravitacional (THVG) gera eletricidade continuamente com pequenas quedas d'água de córregos e riachos, não necessita de barragem e permite a passagem de peixes. É preciso ser feito um desvio no curso d'água para dentro de um tanque com um orifício ao fundo por onde sai a água e está alocada a turbina que recebe a energia do vórtice que é formado dentro do tanque. Com a primeira construída em 2004, no mundo 27 plantas estão em operação (somando 232 kW), 4 em construção e 11 em projeção. O presente estudo tem como objetivo principal melhorar a eficiência da turbina pela mudança na geometria do rotor e do tanque. O emprego do método analítico e método numérico com fluidodinâmica computacional permitiu analisar o comportamento da interação entre a água e a turbina, a geometria da turbina, a vazão de água e a altura da queda d'água, como nos cenários encontrados em diferentes localidades.

Palavras-chave: Hidroeletricidade. Turbina. Vórtice. Fluidodinâmica.

ABSTRACT

The need for electrical energy throughout the world is growing and the search for renewable energy sources is a priority in order to reverse the greenhouse effect caused by the amount of carbon already emitted into the atmosphere by fossil fuel sources. Wind turbines and photovoltaic panels have stood out as alternative renewable sources to large hydroelectric plants, and also serving small projects to meet local needs and/or supply electricity to the grid. However, it is worth highlighting the intermittency of wind and solar energy. Another alternative to meet a small demand, the Gravitational Vortex Hydraulic Turbine (THVG) generates electricity continuously with small waterfalls from streams, does not require a dam and allows the passage of fish. A diversion must be made in the watercourse into a tank with a hole at the bottom where the water comes out and the turbine that receives the energy from the vortex that is formed inside the tank. With the first built in 2004, 27 plants are in operation worldwide (totaling 232 kW), 4 under construction and 11 in planning. The main objective of this study is to improve turbine efficiency by changing the geometry of the rotor and tank. The use of the analytical method and numerical method with computational fluid dynamics made it possible to analyze the behavior of the interaction between water and the turbine, the geometry of the turbine, the water flow and the height of the waterfall, as in scenarios found in different locations.

Keywords: Hydroelectricity. Turbine. Vortex. Fluid dynamics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama da THVG: 1-rio, 2- captação, 3- canal de entrada, 4- base de circulação, 5- rotor,.....	15
Figura 2 – Gráfico da faixa de operação de algumas turbinas hidráulicas, incluindo a THVG.	16
Figura 3 – Demonstrativo do modelo experimental de THVG multiestágio.	17
Figura 4 – Desenho esquemático do experimento com jato.....	17
Figura 5 – Diagrama esquemático de um site com comprimentos aproximados de cada seção (em metros).....	21
Figura 6 – THVG estabelecida em Obergrafendorf, Áustria.....	21
Figura 7 – (a) Transporte da planta portátil. (b) Instalação dos equipamentos.	22
Figura 8 – (a) THVG em baixa inclinação com tubo de entrada estendido. (b) TVHG em série/paralelo.....	22
Figura 9 – Parâmetros de uma THVG com base cônica.....	23
Figura 10 - Representação em secção do local do experimento. (Reservatório e THVG fora de escala).....	25
Figura 11 – Representação do tanque.....	26
Figura 12 – Representação da turbina.	26
Figura 13 – Representação da montagem do tanque e turbina.	27
Figura 14 – Esquema do escoamento do jato d'água na pá da turbina.....	28
Figura 15 – Distribuição de velocidades com o impacto da água na pá.....	28
Figura 16 – Representação do vórtice em coordenadas cilíndricas.....	32
Figura 17 – Resumo dos perfis de velocidade tangencial.	33
Figura 18 – Volume de controle usado para ilustrar a discretização da equação de transporte de um escalar.....	35
Figura 19 – Secador de cabelo com múltiplos componentes.....	39
Figura 20 – Disposição da malha na vista em secção da THVG.....	42
Figura 21 – Condições de contorno.....	42
Figura 22 – Valores residuais da iteração das equações governantes.	43
Figura 23 – Perfil de fração de fluidos. Água em azul, ar em vermelho.....	44
Figura 24 – Perfil de fração de fluidos. Água sendo acelerada pelo rotor.	44
Figura 25 – Vista superior em corte. Velocidades na região do rotor superior.....	45

Figura 26 – Vista superior em corte. Velocidades na região do rotor inferior.	45
Figura 27 – Perfil de velocidade tangencial.	46
Figura 28 – Perfil de velocidade relativa ao eixo Z.	46
Figura 29 – Perfil de velocidade relativa ao eixo Y.	47
Figura 30 – Momento na turbina superior ao longo das iterações.	47
Figura 31 – Momento na turbina inferior ao longo das iterações.	48
Figura 32 – Perfil de fração de fluidos no tanque afunilado. Água em azul, ar em vermelho.	49

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - THVG instaladas, em construção e em proposta no mundo. 19

Quadro 1 - Principais parâmetros da THVG pesquisados. 24

LISTA DE SÍMBOLOS

V_1	Velocidade da água incidente
V_2	Velocidade da água emergente
U	Velocidade da pá da turbina (balde ou hélice)
V_r	Velocidade relativa
ω	Velocidade angular
R	Raio de distância do eixo à pá
k	Coefficiente de resistência friccional
C	Coefficiente de perda
\dot{Q}	Vazão volumétrica
g	Aceleração gravitacional
C_v	Coefficiente do jato
H	Altura da coluna d'água
F	Força
\dot{m}	Vazão mássica
ρ	Massa específica
τ	Torque
\dot{W}	Potência de saída
η	Eficiência
Fr	Número de Froude
Γ	Número de circulação
Re	Número de Reynolds
Sc	Submersão crítica
v_r	Velocidade na direção radial
v_θ	Velocidade na direção tangencial
v_z	Velocidade na direção axial
\emptyset	Variável de interesse
S	Fonte

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Proposta	17
1.2	Justificativa	18
1.3	Objetivos.....	18
1.3.1	Objetivos Específicos	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	Contextualização da tecnologia	19
2.2	Estudos relacionados.....	22
3	METODOLOGIA.....	25
3.1	Projeto da THVG	25
3.2	Método analítico	27
3.2.1	Turbina impulsiva.....	27
3.2.2	Turbina reativa.....	31
3.3	Método numérico	34
3.3.1	Modelo de turbulência	37
3.3.2	Fluxo multifásico.....	37
3.3.3	Teoria da malha dinâmica.....	38
3.3.4	Fluxos com quadros de referência móveis	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1	Método analítico	40
4.2	Método numérico	41
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

O suprimento global de energia se apresenta em diferentes cenários, seja por fonte de energia não-renovável (fósseis ou nuclear) ou renovável (hidráulica, solar, eólica, biomassa, geotérmica ou oceânica). A demanda, por sua vez, necessita de uma fonte segura para o desenvolvimento econômico e, recentemente com mais intensidade, atendendo aos objetivos ambientais de sustentabilidade.

De acordo com o relatório da *International Energy Agency* (IEA, 2022) a perspectiva é de uma aceleração na transição para um sistema energético mais sustentável e seguro, desencadeada pela invasão da Rússia a Ucrânia. E, o cenário avaliado para a demanda global de combustíveis fósseis, pela primeira vez, exibe um pico ou platô.

Dentre os 17 Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS), criados em 2015 pela Organização das Nações Unidas (ONU), o sétimo, Energia Limpa e Acessível, possui três metas: garantir acesso universal a energia acessível, confiável e moderna; dobrar a taxa global de melhorias em eficiência energética; e aumentar substancialmente a parcela de energia renovável no sistema energético (ONU ODS 7).

Em regiões remotas, longe dos centros urbanos, a distância impacta fortemente a viabilidade técnica e econômica de ligação a uma rede de transmissão de energia, sendo preciso instalar um sistema independente que, por vezes, necessite de mais de uma fonte de geração de energia e armazenamento, como é o caso da energia intermitente provinda das fontes solar e eólica.¹

O desenvolvimento tecnológico relacionado a eficiência na geração, transmissão e armazenamento de energia tem permitido que não apenas as regiões remotas, mas qualquer região produza sua própria energia e, se possível, a exporte – o que alguns autores chamam de autossuficiência energética² e distritos energeticamente positivos³, respectivamente.

Nesse contexto, visando suprir uma demanda local, a geração de energia por Turbina Hidráulica de Vórtice Gravitacional (THVG) é aplicada a baixas quedas d'água e, segundo Velásquez *et al.* (2021), por não ter participação significativa na cobertura da demanda

¹ SILVA, Poliana. **Estudo de compartilhamento de carga entre múltiplas fontes renováveis compondo uma microrrede CC**. 2018.

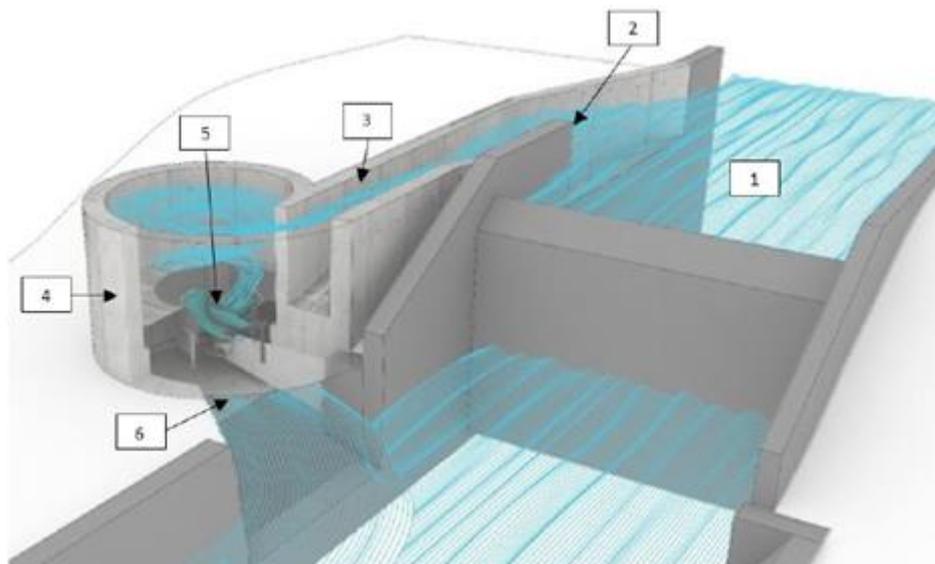
² URSIN GSTÖHL, Stefan P. **Energy self-sufficient households with photovoltaics and electric vehicles are feasible in temperate climate**. 2020.

³ SAVIS *et al.* **Positive Energy Districts: Identifying Challenges and Interdependencies**. 2021.

energética de países industrializados, é denominada como um método não-convencional de geração de energia.

Nesse sistema, parte da água de um rio é captada e conduzida por um canal até chegar ao tanque, onde o vórtice é formado. Do tanque a água escoa por um orifício central ao fundo e retorna para o rio. Alinhada ao eixo vertical do tanque, uma turbina rotaciona com o impulso gerado pelo vórtice. A Figura 1 ilustra uma planta para geração de energia por THVG.

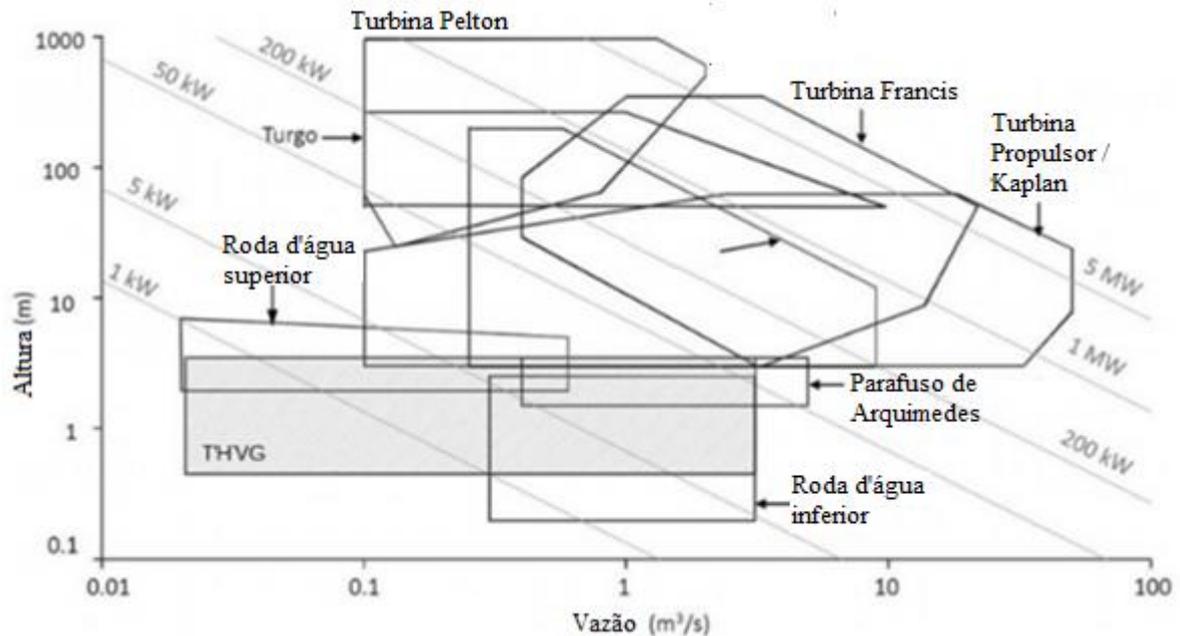
Figura 1 – Diagrama da THVG: 1-rio, 2- captação, 3- canal de entrada, 4- base de circulação, 5- rotor, 6- descarga.



Fonte: Engenhariacivil.com (2018) apud Guzmán *et al.* (2019).

Em comparação com outras tecnologias de baixa queda d'água, de acordo com Guzmán *et al.* (2019) a THVG compartilha as mesmas vantagens ambientais de promover a aeração da água, permitir a passagem de peixes e detritos e não precisar de barragem, e a desvantagem de ser preciso um bom controle da vazão para manter a eficiência da turbina. Em relação a pequenas hidroelétricas, Sierra *et al.* (2020) afirma que as THVG são mais baratas e não requerem trabalho pesado e manutenção cara. A Figura 2 apresenta em gráfico a relação queda e vazão d'água na geração de energia para as turbinas hidráulicas mais usuais, incluindo a THVG.

Figura 2 – Gráfico da faixa de operação de algumas turbinas hidráulicas, incluindo a THVG.



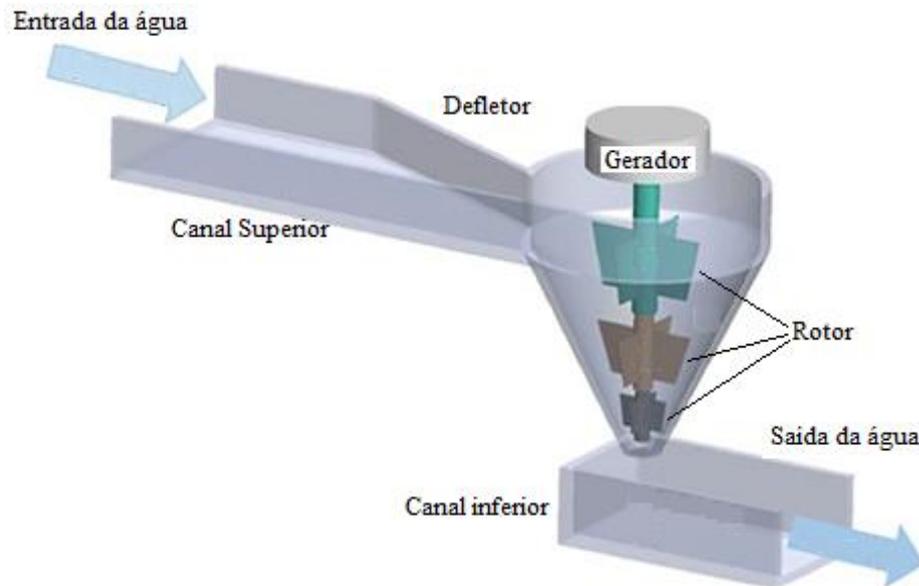
Fonte: Velásquez *et al.* (2021), modificado pelo autor.

Considerando a imaturidade da tecnologia de THVG em relação a outras tecnologias de geração hidroelétrica, para embasar a proposta deste trabalho (subitem seguinte) cabe destacar duas linhas de pesquisa que promovem significativa mudança na configuração padrão de THVG apresentada nas figuras anteriores.

A turbina multiestágio é a primeira linha de pesquisa destacada. O perfil de velocidade do vórtice varia com a altura, assim, rotores independentes em diferentes alturas são colocados no eixo da turbina (Figura 3). Ullah *et al.* (2020) afirma que a interação entre as pás dos rotores e a água faz com que o vórtice seja fortalecido.

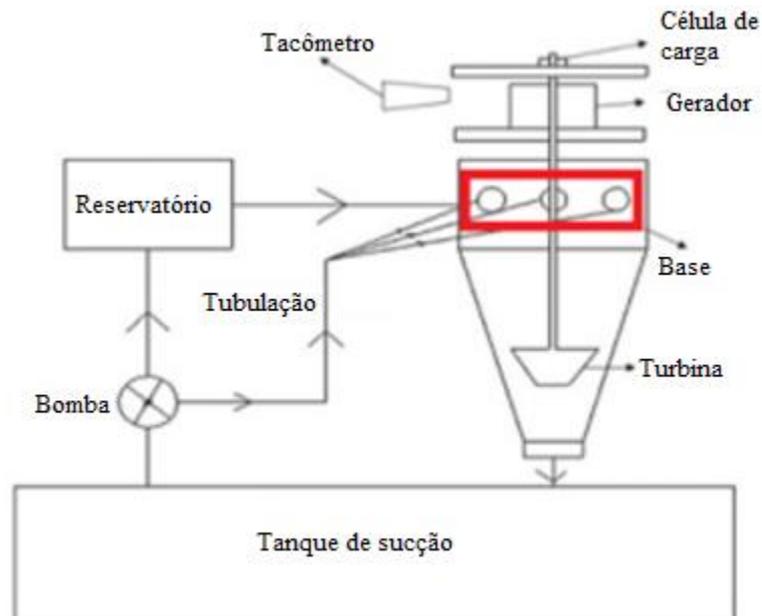
A segunda linha de pesquisa aplica jatos de água tangente ao tanque para intensificar o vórtice (Figura 4).

Figura 3 – Demonstrativo do modelo experimental de THVG multiestágio.



Fonte: Ullah *et al.* (2020), modificado pelo autor.

Figura 4 – Desenho esquemático do experimento com jato.



Fonte: Srihari *et al.* (2019) apud Velásquez *et al.* (2021), modificado pelo autor.

1.1 Proposta

Assim como acontece com as configurações de multiestágio e jatos, espera-se que a turbina proposta não desestabilize o vórtice e que os jatos atuem sustentando o vórtice.

Porém, para o emprego do jato é preciso maior quantidade de energia e, nesse cenário, o mais comum seria a energia provinda de uma maior queda d'água. Dessa forma, o uso do jato

abre caminho para a aplicação da THVG não apenas em rios, mas também onde há barragens, podendo concorrer com outras tecnologias já maduras que, a depender dos parâmetros envolvidos⁴, o uso da THVG pode ser vantajoso. Por exemplo, caso seja importante uma baixa vazão do reservatório^{5,6}, pois espera-se uma melhor relação ‘vazão x geração’ com essa proposta.

Para isso, no presente trabalho foi realizada a análise numérica por meio de fluidodinâmica computacional e a análise teórica utilizando o balanço da quantidade de movimento.

1.2 Justificativa

O acesso à energia elétrica promove o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida. No entanto, perde-se qualidade de vida com a emissão de gases na atmosfera provindos de geradores movidos a combustíveis fósseis. Para reverter esse cenário, diversas iniciativas estão sendo tomadas a fim de substituir o uso desse combustível. Assim, justifica-se este trabalho de estudo para ampliar as oportunidades de emprego para a fonte de energia renovável do tipo hidráulica.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é realizar a análise das grandezas físicas e geométricas de uma turbina hidráulica projetada para produção de energia por vórtice gravitacional suportado por jato d’água.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Realizar a análise numérica e teórica de uma THVG;
- Verificar a estabilidade do volume de água no tanque;
- Correlacionar a potência hidráulica com a potência transferida pela turbina;
- Correlacionar resultados encontrados a outros estudos sobre THVG.

⁴ CAMPOS, Pedro H. F. **Otimização do Planejamento da Operação Hidro-energética Para O Curto Prazo.** 2022.

⁵ GÖRTZ, J. *et al.* **Assessment of pumped hydropower energy storage potential along rivers and shorelines.** 2022.

⁶ LUGAUER, F. J.; KAINZ, J.; GADERER, M. **Techno-economic efficiency analysis of various operating strategies for micro-hydro storage using a pump as a turbine.** 2021.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Contextualização da tecnologia

Segundo Sierra *et al.* (2020), no mundo são 27 plantas em operação (somando 231,8 kW), 4 em construção e 11 em projeção. A Tabela 1 lista dados sobre THVG instaladas, em construção e em proposta no mundo.

Tabela 1 - THVG instaladas, em construção e em proposta no mundo.

País	Cidade	Ano/ Situação	Queda (m)	Vazão (m ³ /s)	Capacidade (kW)
Australia	Kalorama	2004	0,8	0,05	0,2
Áustria	Obergrafendorf	2005	0,9	0,9	10
Australia	Marysville	2008	0,6	0,11	11
Suíça	Schöftland	2009	1,5	1	15
Suíça	Suhr, Aargau	2009	1,5	2,2	15
Lituânia	Kaunas	2010	1,5	0,5	4,4
Áustria	St. Veit an der Glan	2011	0,9	0,7	3,3
Alemanha	Niedersfel, Winterberg	2012	1,4	0,5	4,7
Alemanha	Wesentz, Sachsen	2013	1,2	0,5	6
Tailândia	Taksinmaharat	2014	1,5	1	8,5
Itália	San Vito	2014	0,4	0,9	4
Indonésia	Bali	2015	1,8	1	15
Peru	Junin	2016	1,4	0,9	7,2
Nepal	Katmandú	2016	1,5	2	1,6
Chile	Doñihue	2017	2,1	2	15
Itália	Sesto Campano	2017	1,5	1	9
Itália	Bivio Mortola	2017	1,8	0,8	9
Índia	Kerela	2018	1,5	1	10
Estônia	Otepää	-	1,6	0,75	5,5
Áustria	-	-	1,8	1	10
Áustria	-	-	1,5	0,9	8,3
Áustria	-	-	1,2	1,2	7,5
Áustria	-	-	1,4	0,6	5
Áustria	-	-	1	0,9	4,6
Áustria	-	-	1,4	0,5	4
Áustria	-	-	1,6	2	18
Índia	Dabka, Nainital	-	2	1,5	20
Reino Unido	Chester	Construindo	1,5	1000	100
Taiwan	Ylang	Construindo	3,3	5,8	600
França	Versalles	Construindo	3,2	0,7	5,5
Chile	Cunco	Construindo	1,5	0,9	5
Filipinas	Mindanao	Proposta	-	-	120-150
EUA	New York	Proposta	-	-	10-100
Reino Unido	Haughton	Proposta	1,1	2	28
Reino Unido	Frome	Proposta	1,5	1	28

País	Cidade	Ano/ Situação	Queda (m)	Vazão (m ³ /s)	Capacidade (kW)
Reino Unido	Northampton	Proposta	2,2	2	28
Reino Unido	Otterburn	Proposta	1,9	2	25
Índia	Karbi Anglong	Proposta	-	-	13
Índia	Heng Bung	Proposta	1,5	1,5	12
Reino Unido	Warmingham	Proposta	1,9	0,9	12
Reino Unido	Milton Keynes	Proposta	1,2	1,2	10
Índia	Chereerapunji	Proposta	-	-	9

Fonte: Sierra *et al.* (2020).

De acordo com Sierra *et al.* (2020), existem apenas cinco companhias no mundo que fabricam e instalam THVG:

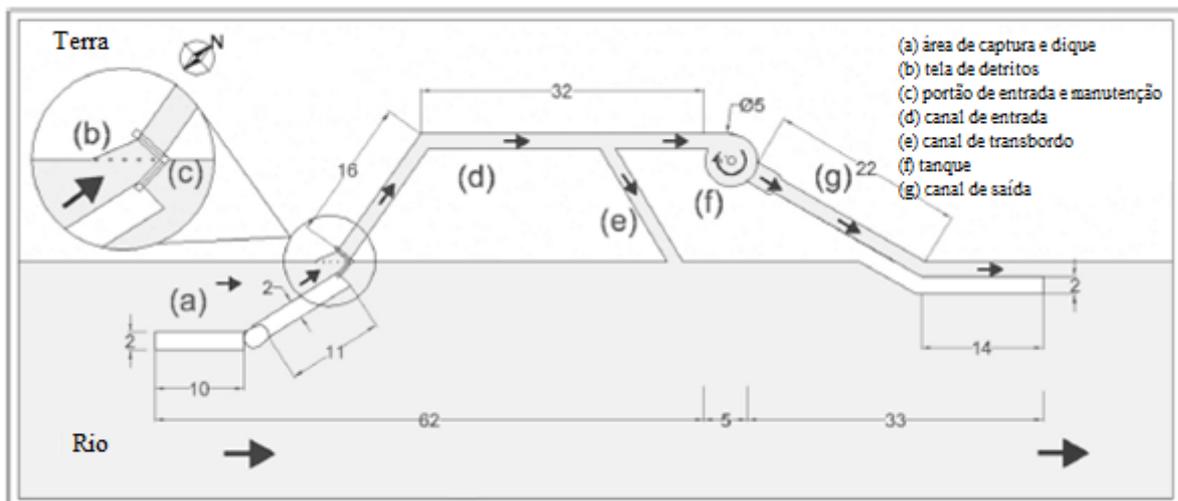
- Zotlöterer é uma companhia localizada em Obergrafendorf, Austria. Estabelecida em 2004, planeja e desenha THVG em diferentes países. Adicionalmente, otimiza turbinas eólicas de baixa velocidade. Em 2005, a companhia construiu a sua primeira THVG, a qual supre 60.000 kWh por ano para cerca de 15 casas;
- Kourispower PTY. LTD. é uma companhia Australiana que desenha e fabrica THVG e faz melhorias em transmissões elétricas e usina hidroelétrica reversa. Em 2008, eles conduziram um teste na Austrália com potência gerada de 12 kWh por dia;
- AquaZoom AG (previamente conhecida como Green Renewables) é uma companhia Suíça fundada em 2015. Sua primeira THVG foi construída em Suhr, Suíça, sob o nome de Green Renewables. Sob o nome de AquaZoom, a primeira THVG foi construída em Kerela, Índia, com 10 kW de capacidade;
- Wasserwirbelkraftwerke Schweiz é uma parceria de FLS Biobau GmbH, Ingenieurbüro Arnet GmbH e Tree Engineering GmbH. Estabelecida em 2011, em Schöftland, Suíça. Ela desenha, planeja e constrói THVG. Em 2011 eles instalaram uma THVG teste de 10-15 kW de capacidade;
- Turbulent Hydro é uma companhia Belga fundada em 2015. Ela pesquisa, desenha e constrói THVG. Sua primeira turbina foi implementada em Doñihue, Chile, em 2017, e supre 15 kW para cerca de 60 casas rurais.

A Figura 5 apresenta o diagrama esquemático de uma planta no Peru construída um pouco afastada da margem para proteger contra inundações. É mostrado o sistema de captação de água do rio por meio de dique e pequena represa, com canal de entrada, tanque e canal de descarga. A inserção ampliada mostra os portões de entrada e manutenção, juntamente com a tela de

detrimentos. As setas indicam a direção do fluxo de água. A Figura 6 retrata o canal de entrada, o tanque e o canal de descarga de uma planta na Áustria.

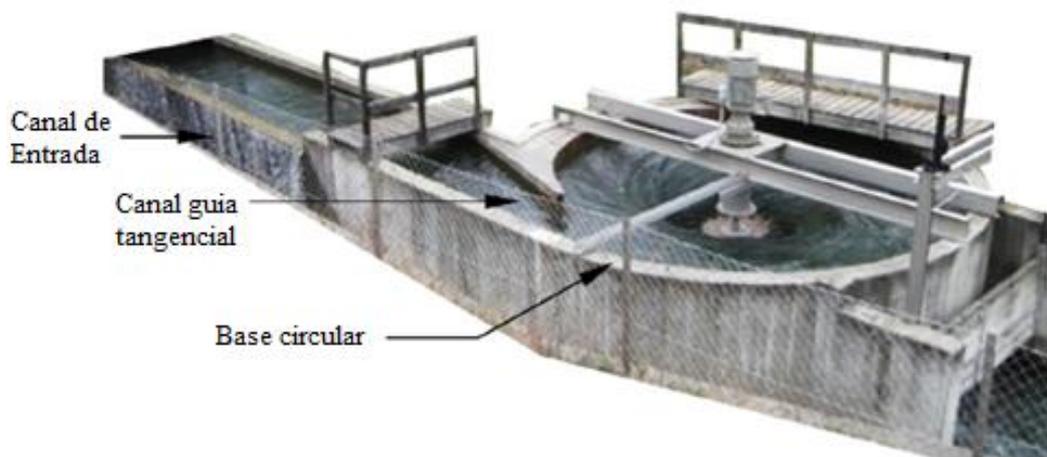
A companhia Kourispower PTY. LTD oferece uma planta portátil e faz a instalação da THVG em 12 horas (Figura 7). Com esse modelo a empresa oferece uma variedade e versatilidade de configurações para a instalação da planta, inclusive com THVG em série ou paralelo (Figura 8).

Figura 5 – Diagrama esquemático de um site com comprimentos aproximados de cada seção (em metros).



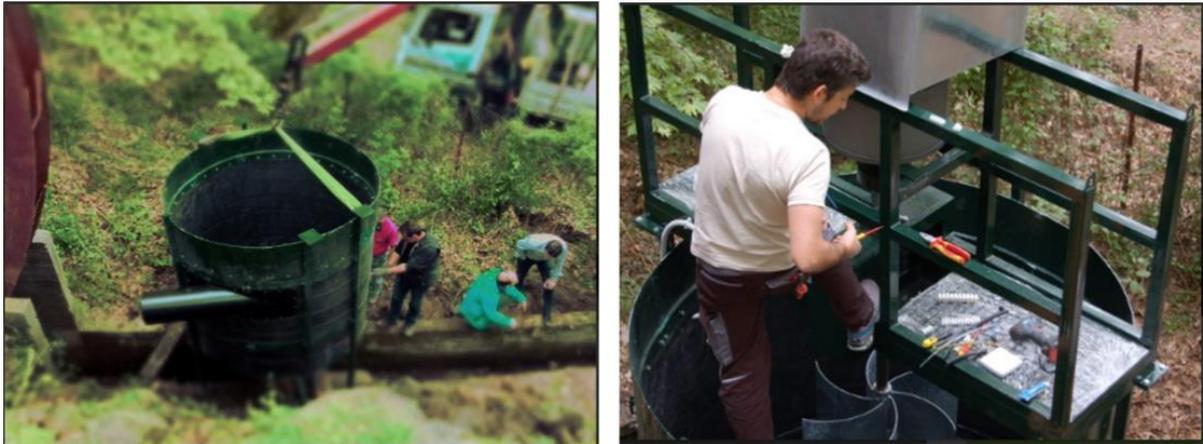
Fonte: Guzmán *et al.* (2019), modificado pelo autor.

Figura 6 – THVG estabelecida em Obergrafendorf, Áustria.



Fonte: Edirisinghe *et al.* (2022).

Figura 7 – (a) Transporte da planta portátil. (b) Instalação dos equipamentos.

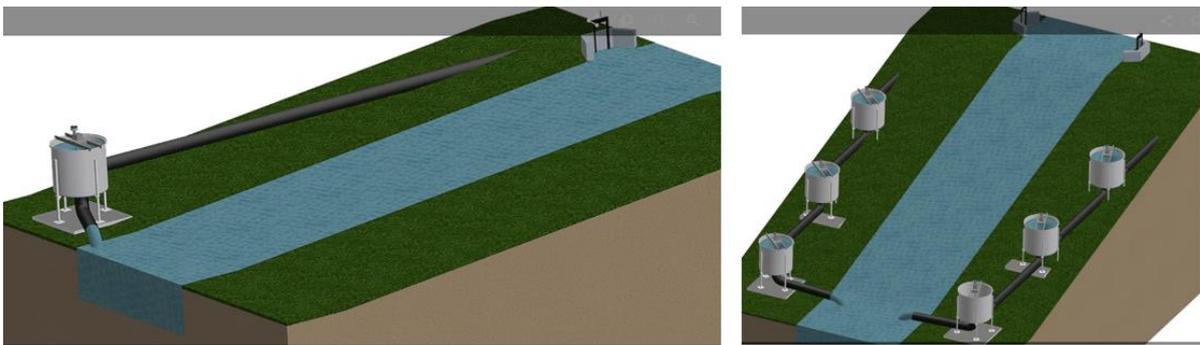


(a)

(b)

Fonte: <http://www.kcthydropower.com/> acesso em 16/11/2022.

Figura 8 – (a) THVG em baixa inclinação com tubo de entrada estendido. (b) TVHG em série/paralelo.



(a)

(b)

Fonte: <https://www.kourispower.com/technology/> acesso em 16/11/2022.

2.2 Estudos relacionados

O estudo sobre os vórtices é extenso pois este fenômeno está presente em diversos processos em que há fluido em movimento. Frequentemente é encontrado na atmosfera com a formação de ciclones ou mesmo em casa com o escoar da água pelo ralo da pia. Por vezes, podem causar prejuízo ao funcionamento de turbinas e bombas devido a entrada de ar na tomada de água pelo surgimento de vórtice de superfície livre.

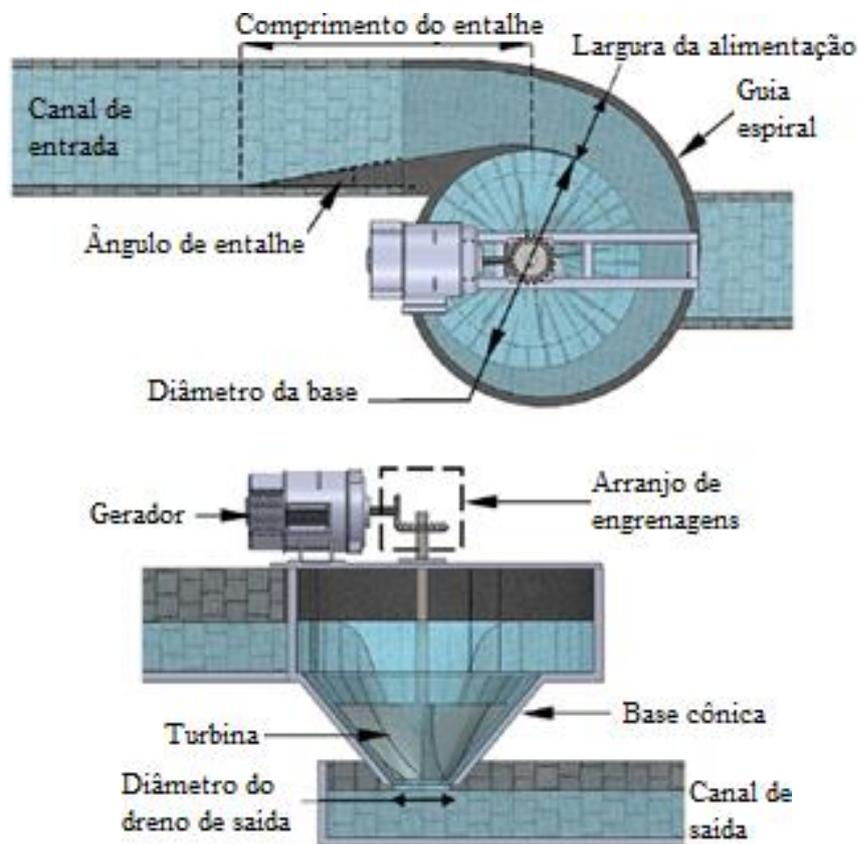
Sobre a determinação da camada interna e externa do vórtice livre, Azarpira e Zarrati (2019) destacam que não há na literatura definição adequada e várias relações já foram propostas. Mulligan *et al.* (2020) apontaram discrepâncias entre suas análises numéricas e experimentais de escala prática sobre vórtices livres com núcleo de ar e informou continuar a trabalhar no assunto para propor um modelo mais fiel.

Powalla, *et al.* (2021), por meio de experimento em escala prática, e com o objetivo de desenvolver um modelo *Digital Twin* para THVG, admitiu que apesar da geometria relativamente simples, a investigação numérica é difícil em razão da complexidade da superfície livre gerada pelo vórtice, e piora ao se adicionar o elemento rotativo (turbina). Sobre essa complexidade, Sierra *et al.* (2020) destaca que apenas poucas pesquisas estudaram a THVG com a turbina, ainda que seu projeto influencie significativamente a sua eficiência.

Saleem *et al.* (2020), por meio de experimento, concluiu que a altura do vórtice e uma boa forma de vórtice, com núcleo de ar completamente formado, são os principais parâmetros para a eficiência da THVG.

Segundo Velásquez *et al.* (2021), em revisão da literatura sobre THVG, as pesquisas se concentram em aumentar a eficiência do sistema e para isso propõem mudanças na geometria do tanque e do canal de entrada, e no tipo de rotor e a sua posição no eixo (Figura 9). Também destaca que, quando incluído o rotor na análise, o objetivo foi obter a maior potência de saída, e quando excluído da análise, o objetivo foi aumentar a circulação no tanque (ou velocidade tangencial), o que está associado a um vórtice bem formado e estável.

Figura 9 – Parâmetros de uma THVG com base cônica.



Fonte: Edirisinghe, *et al.* (2022), modificado pelo autor.

Os principais parâmetros pesquisados são listados no Quadro 1.

Quadro 1 - Principais parâmetros da THVG pesquisados.

Elemento da THVG	Parâmetro
Turbina	Quantidade de turbinas no eixo Posição da turbina no eixo Desenho da hélice Material da hélice Quantidade de hélice por turbina
Tanque	Diâmetro do orifício de saída de água Formato da base Altura Desenho do orifício entrada/saída de água Volume de entrada de água

Fonte: autoria própria.

Apesar de uma quantidade de pesquisas sobre o assunto terem sido feitas, Sierra *et al.* (2020), em trabalho de revisão bibliográfica, mostra não ser possível reportar uma geometria ótima, talvez devido à falta de conhecimento da sua relação com a eficiência da THVG, e ainda contesta que alguns autores não são muito claros nos seus estudos e modelos matemáticos.

As THVG revisadas neste trabalho, diferem da aqui proposta em alguns desenhos de projeto, entretanto, todas visam sustentar o vórtice como forma de manter a eficiência. O capítulo seguinte relaciona algumas pesquisas a proposta.

3 METODOLOGIA

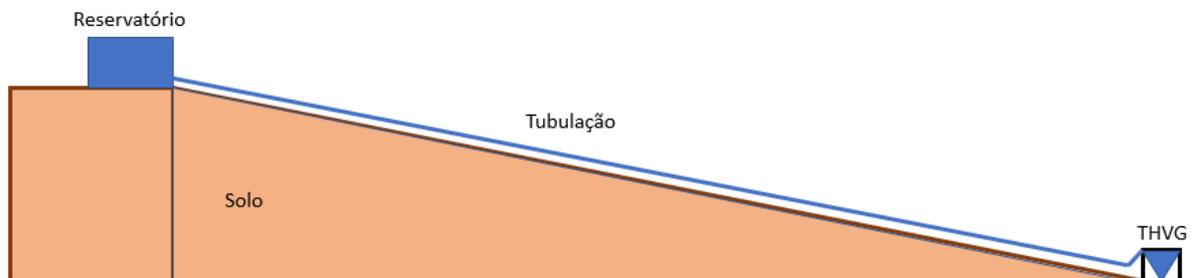
Neste capítulo, primeiro é apresentado o projeto proposto e, em seguida, os métodos empregados na pesquisa.

Dois métodos matemáticos foram abordados. O método analítico para a análise da geométrica por meio da conservação de energia e o método numérico de partículas de fluido, regiões de contorno e iterações numéricas de equações diferenciais que representam o movimento do fluido e sua interação com o sólido.

3.1 Projeto da THVG

A Figura 10 ilustra a visão em secção do local onde se pretende experimentar a THVG projetada. O reservatório no alto do terreno alimenta a THVG com duas tubulações de 2 polegadas. Em cada tubulação o jato d'água sai a 7 m/s, totalizando 27,475 l/s de vazão entrando no tanque.

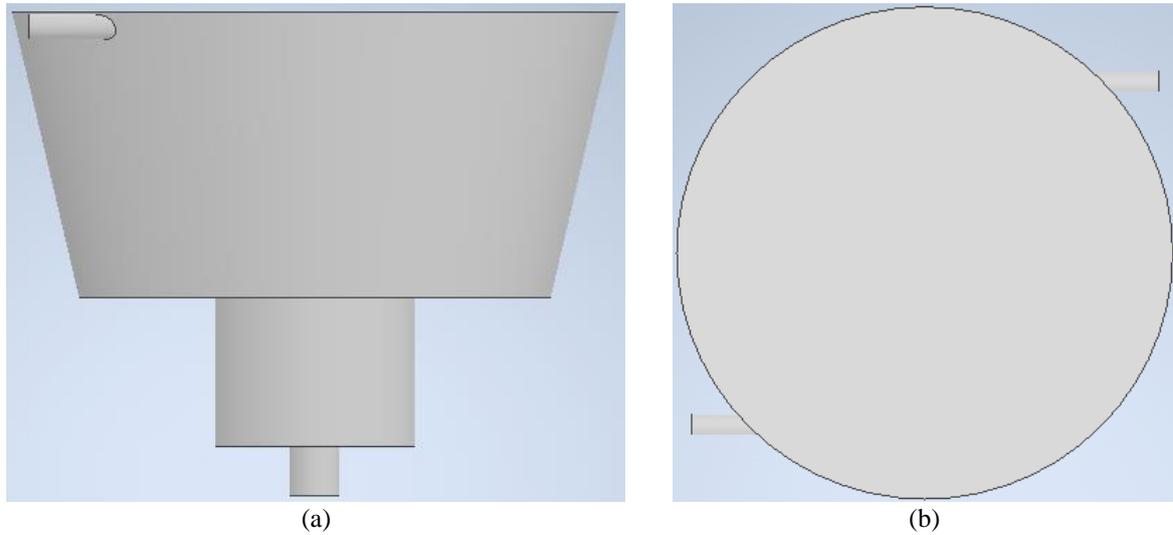
Figura 10 - Representação em secção do local do experimento. (Reservatório e THVG fora de escala)



Fonte: autoria própria.

Os componentes da THVG, tanque e turbina, foram desenhados no software Inventor Autodesk. O tanque da THVG consiste em uma caixa d'água de 500 l (diâmetro da base 1 m, diâmetro do topo 1,2 m, altura 0,58 m), com um balde de 50 l conectado ao fundo (0,4 m de diâmetro e de altura), com um cano de 4 pol conectado ao fundo, por onde sai a água (Figura 11-a). A entrada da água se dá por dois tubos de 2 pol conectados em lados opostos e quase tangencialmente a parte superior do tanque (Figura 11-b).

Figura 11 – Representação do tanque.

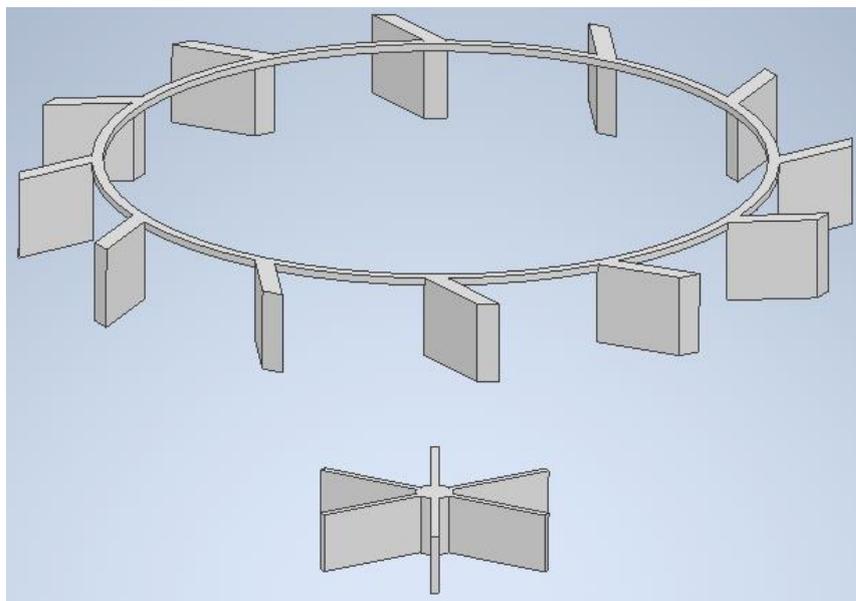


Fonte: autoria própria.

A turbina pode ser compreendida como um equipamento que usa dois modelos de turbina. Na parte superior, uma turbina recebe o impulso do jato d'água, e na parte inferior, outra turbina reage ao arrasto do vórtice formado (Figura 12). Não existe haste ou suportes entre elas porque são tratados como corpos independentes situados numa região fixa no tanque. A geometria das pás das turbinas é retangular para simplificar e facilitar a simulação numérica.

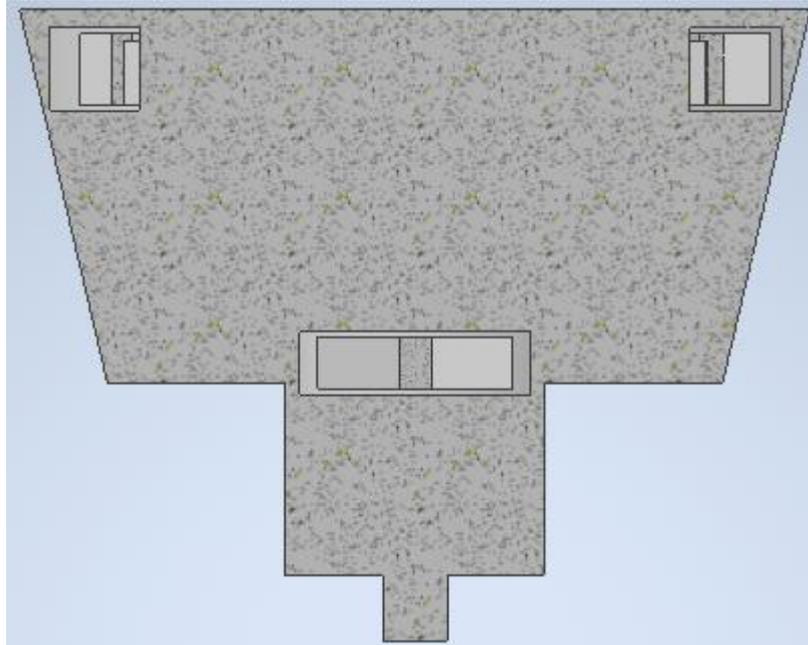
A montagem da turbina e tanque, ilustrada na Figura 13, é o modelo geométrico exportado para o software de simulação fluidodinâmica.

Figura 12 – Representação da turbina.



Fonte: autoria própria.

Figura 13 – Representação da montagem do tanque e turbina.



Fonte: autoria própria.

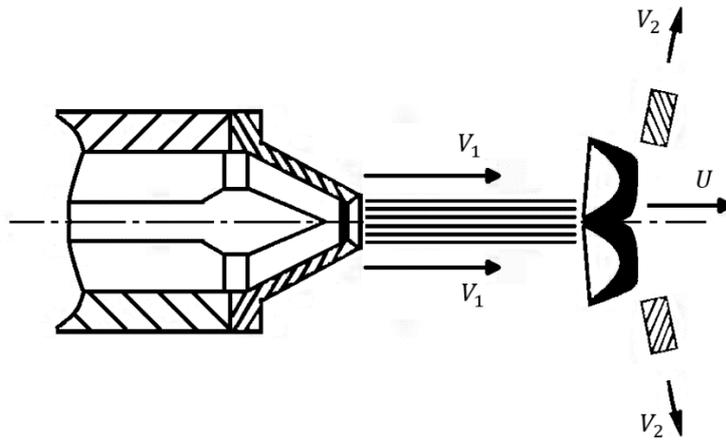
3.2 Método analítico

Como são duas turbinas acopladas em uma, a análise pode ser feita em duas etapas. Na primeira etapa, é feita a análise da turbina impulsiva que recebe o jato e, na segunda etapa, a análise da turbina reativa que rotaciona com o vórtice.

3.2.1 Turbina impulsiva

A Figura 14 ilustra o jato d'água ao sair do bocal convergente, atingir a pá de uma turbina Pelton e ser defletida. A turbina gira no sentido anti-horário com uma velocidade angular ω devido à ação combinada de um jato de água incidente de velocidade V_1 e um torque de resistência no sentido horário. A água sai com velocidade emergente V_2 e a pá move com velocidade U ,

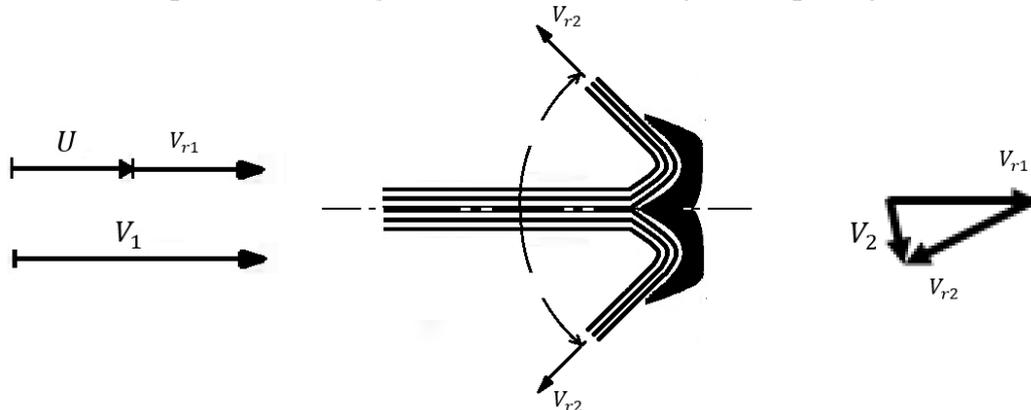
Figura 14 – Esquema do escoamento do jato d'água na pá da turbina.



Fonte: G. Cussins LTD, em <https://people.rit.edu/rfaiete/courses/tflab/Cussons/pelton/pelton.htm> acesso em 04/12/2022

Para a análise de velocidade será usado o triângulo de velocidades na pá da turbina Pelton, tendo esta como referência, conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Distribuição de velocidades com o impacto da água na pá.



Fonte: G. Cussins LTD, em <https://people.rit.edu/rfaiete/courses/tflab/Cussons/pelton/pelton.htm> acesso em 04/12/2022

A velocidade incidente do jato relativa à pá (V_{r1}) é dada pela (Eq. 1), na qual ω é a velocidade angular e R a distância do eixo à pá,

$$V_{r1} = V_1 - U = V_1 - \omega R \quad (1)$$

Uma vez que os jatos incidente e emergente estão expostos à pressão atmosférica, a magnitude da V_2 será apenas ligeiramente menor que V_1 devido à resistência friccional. Assim, V_2 pode ser obtida pela introdução de um coeficiente de resistência friccional (k) de modo que,

$$|V_{r2}| = k V_{r1} \quad (2)$$

O jato será desviado de modo que o V_2 esteja em um ângulo agudo θ com V_1 . A mudança na componente da velocidade no plano da roda (ou seja, na linha de V_1) será,

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_{r1} + V_{r2} \cos \theta = V_{r1}(1 + k \cos \theta) \\ &= (V_1 - U)(1 + k \cos \theta) \end{aligned} \quad (3)$$

que pode ser reescrita com o coeficiente de perda (C),

$$\Delta V = (V_1 - U)(1 + C) \quad (4)$$

A vazão do jato (\dot{Q}) no bico é dada pelo produto de V_1 com a sua abertura (A),

$$\dot{Q} = A V_1 \quad (5)$$

Pelo princípio da conservação de energia, considerando o fluido sem viscosidade e atrito em um conduto fechado, sob efeito da gravidade (g), e considerando o coeficiente do jato (C_v), V_1 é dada em função da altura d'água (H),

$$V_1 = C_v \sqrt{2 g H} \quad (6)$$

Assim, a vazão do jato pode ser obtida com a substituição da (Eq. 6) na (Eq. 5),

$$\dot{Q} = A C_v \sqrt{2 g H} \quad (7)$$

A força (F) exercida na pá pelo jato é obtida da segunda lei de Newton pela taxa de variação do momento entre os jatos incidente e emergente no plano da roda – \dot{m} é a taxa de variação da massa e ρ é a massa específica,

$$F = \dot{m} \Delta V = \dot{Q} \rho \Delta V \quad (8)$$

O torque (τ) atuando no eixo da turbina é,

$$\tau = F R \quad (9)$$

e a potência de saída (\dot{W}) é,

$$\dot{W} = \tau \omega \quad (10)$$

substituindo as equações (Eq. 8), (Eq. 9), (Eq. 3) na (Eq. 10),

$$\dot{W} = A C_v \sqrt{2 g H} \rho U (V_1 - U)(1 + k \cos \theta) \quad (11)$$

Para uma determinado bocal e área de bocal, a potência de saída será máxima se C_v e k tiverem seus valores mais altos possíveis, se $\cos \theta = 1$ e se $U(V_1 - U)$ for um máximo.

Para encontrar a velocidade da pá da turbina na potência máxima, deriva-se \dot{W} em relação U e iguala-se a zero. $U(V_1 - U)$ será máximo quando $V_1 = 2 U$, ou seja, quando a velocidade do jato incidente for o dobro da velocidade da pá da turbina. Para $\cos \theta = 1$ então $\theta = 0$ e em relação a pá o jato incidente é desviado em 180° , além disso se $k = 1$ então $V_{r1} = V_{r2}$.

Com $V_1 = 2 U$, $V_{r1} = U$, e ignorando o atrito nas pás ($V_{r2} = U$), a velocidade absoluta do jato emergente no plano da roda será então zero, toda a carga de velocidade do jato incidente terá sido convertida em trabalho útil e a água cairá da borda traseira das pás. A potência máxima de saída é dada por

$$\dot{W}_{max} = \dot{Q} \rho V_1^2 / 2 = A \rho V_1^3 / 2 = A \rho C_v^3 (2 g H)^{3/2} / 2 \quad (12)$$

Se o torque de resistência for reduzido, a roda acelerará, $(V_1 - U)$ reduzirá e o caso limite, que não seria obtido na prática, seria quando $U = V_1$. Para esta condição o torque e a potência seriam ambos nulos. Se o torque de resistência for aumentado, a roda pode parar de forma que $U = 0_1$ e o torque de parada será

$$\tau_{max} = \dot{Q} \rho R V_1 (1 + C) \quad (13)$$

A potência hidráulica (\dot{W}_{in}) de entrada na turbina é o produto da pressão (P) de entrada e vazão (\dot{Q}),

$$\dot{W}_{in} = P \dot{Q} = \rho g H \dot{Q} \quad (14)$$

A eficiência da turbina (η) é,

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{W}_{in}} = \frac{\dot{Q} \rho U \Delta V}{\dot{Q} \rho g H} = \frac{U \Delta V}{g H} \quad (15)$$

Como a potência hidráulica de entrada depende apenas altura da água (H) e da abertura do bico (A) e é independente da velocidade da turbina, a eficiência é diretamente proporcional à potência de saída e, portanto, a potência máxima e a eficiência máxima ocorrem nas mesmas condições. Substituindo a (Eq. 4) na (Eq. 15),

$$\eta_{max} = \frac{U (V_1 - U)(1 + C)}{g H} \quad (16)$$

Para a potência máxima $V_1 = 2 U$,

$$\eta_{max} = \frac{V_1^2(1 + C)}{4 g H} \quad (17)$$

Substituindo a (Eq. 6) na (Eq. 17),

$$\eta_{max} = \frac{C_v^2 (1 + C)}{2} = \frac{C_v^2 (1 + k \cos \theta)}{2} \quad (18)$$

Em uma situação ideal, C_v , k e $\cos \theta$ são todos iguais a 1 e, portanto, a eficiência máxima é a unidade, em teoria.

3.2.2 Turbina reativa

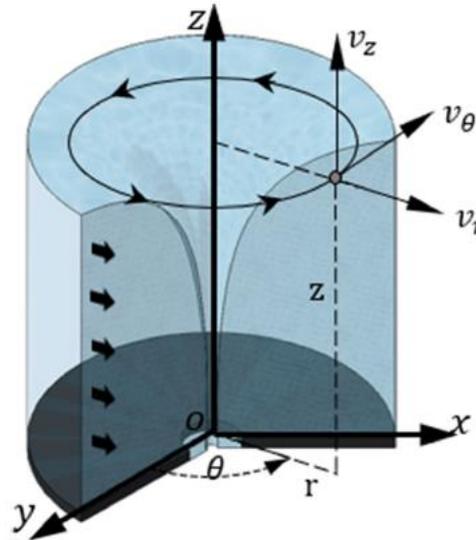
De acordo com Domfeh, *et al.* (2020), a formação de vórtice de superfície livre em dutos horizontais de tomada d'água depende de vários fatores, os quais destacam-se o número de Froude (Fr), o número de circulação (Γ), o número de Reynolds (Re) e a Submersão crítica (Sc). Segundo Ahn, *et al.* (2017 apud DOMFEH, *et al.*, 2020), a submersão crítica é a submersão abaixo da qual o vórtice incipiente é formado em tomadas d'água horizontais e é fonte de diversos estudos pois, como dito anteriormente, a entrada de ar nas turbinas por meio do vórtice provoca uma série de danos as máquinas. O campo de escoamento dominante nos vórtices é a circulação que é indicada pela componente de velocidade tangencial.

Dependendo do comportamento do núcleo de ar, Mulligan (2015) caracteriza o fluxo de vórtice como vórtice fraco e forte. O fluxo axial é dominado em um campo de vórtice fraco,

enquanto uma circulação de campo de vórtice forte é dominada por um núcleo de ar contínuo estável.

É conveniente descrever o sistema de vórtices em termos das coordenadas cilíndricas (r, θ, z) usando o vetor velocidade (v_r, v_θ, v_z) correspondendo às direções radial (r), tangencial (θ) e axial (z), e a rotação de linhas de corrente concêntricas virtuais são em torno do eixo z , como mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Representação do vórtice em coordenadas cilíndricas.



Fonte: Edirisinghe, *et al.* (2022).

Ao resolver a equação de Navier-Stokes (Eq. 19) em continuidade e três equações de momento no sistema de coordenadas cilíndricas com suposições de fluxo constante, assimétrico e invíscido com derivadas axiais como insignificamente pequenas, a componente de velocidade tangencial simplifica para a relação expressa na (Eq. 20),

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{v_\theta^2}{r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} = v \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right) \quad (19)$$

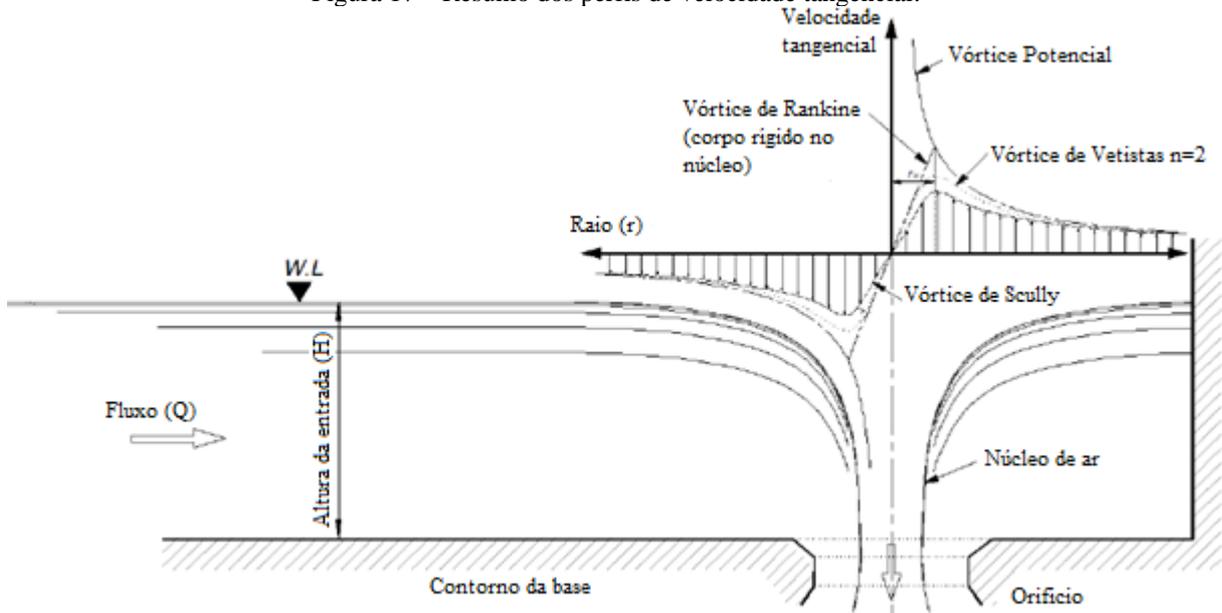
$$v_\theta r = \text{const.} \quad (20)$$

onde a constante é igual a $\Gamma/2\pi$ em termos físicos relativos e r é a distância radial. A circulação (Γ) é matematicamente definida como a integral de linha da componente tangencial da velocidade. Este é o modelo clássico de velocidade de vórtice para fluxo irrotacional ideal e, segundo Mullinan, *et al.* (2020) o perfil de velocidade tangencial assume a forma de,

$$v_{\theta}(r) = \frac{1}{r} \quad (21)$$

Considerando o significado físico do vórtice livre, o modelo de vórtice de Rankine é considerado um dos modelos pioneiros, posteriormente muitos profissionais sugeriram correções a este modelo, como o vórtice de Vartistas e o vórtice de Scully. Algumas das correções são ilustradas na Figura 17, juntamente com a distribuição de velocidade tangencial ideal.

Figura 17 – Resumo dos perfis de velocidade tangencial.



Fonte: Mullinan, *et al.* (2020), modificado pelo autor.

Em um fluido newtoniano real, os efeitos da viscosidade limitam a tendência do fluido de atingir a singularidade infinita quando r tende a zero. Para levar em conta a viscosidade no campo próximo, o modelo analítico simples desenvolvido por Rankine (Eq. 22) descreve o campo de velocidade representando a região central através da rotação do corpo rígido (rotacional, vórtice forçado) em $r \leq r_c$, onde r_c é o raio do núcleo. Isso é descrito analiticamente como,

$$v_{\theta}(r) = \begin{cases} \frac{\Gamma r}{2 \pi r_c^2} & \text{quando } r \leq r_c \\ \frac{\Gamma}{2 \pi r} & \text{quando } r \geq r_c \end{cases} \quad (22)$$

Desprezando os efeitos da tensão superficial e viscosidade no perfil da superfície da água, a (Eq. 19) pode ser simplificada para resultar na (Eq. 23).

$$\frac{v_{\theta}^2}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (23)$$

Substituindo a (Eq. 22) pelo campo de velocidade irrotacional na (Eq. 23) e integrando, uma expressão para o perfil da superfície do vórtice de água pode ser obtida,

$$h_1 - h_2 = \frac{1}{g} \left(\frac{\Gamma}{2\pi} \right)^2 \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2} \right) \quad (24)$$

Sabendo a distribuição de velocidade do fluido no tanque torna-se possível determinar a reação da turbina por meio da análise do triângulo de velocidades do fluido no rotor, de forma análoga a descrita no subitem anterior (3.2.1.1).

3.3 Método numérico

O software de fluidodinâmica computacional utilizado, ANSYS Fluent, baseia-se no método do volume de controle para converter a equação de transporte escalar geral em sistemas lineares que podem ser resolvidos numericamente. Esta técnica consiste em integrar a equação de transporte em torno de cada volume de controle, produzindo uma equação discreta que expressa a lei de conservação com base no volume de controle.

A discretização pode ser apresentada considerando a equação de conservação não permanente para o transporte de uma quantidade escalar ϕ escrita na forma integral para um volume de controle arbitrário como segue:

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint_A \rho \phi \vec{v} d\vec{A} = \oint_A \Gamma_{\phi} \nabla \phi d\vec{A} + \int_V S_{\phi} dV \quad (25)$$

onde Γ_{ϕ} e S_{ϕ} representam o termo convectivo e a fonte da quantidade escalar ϕ .

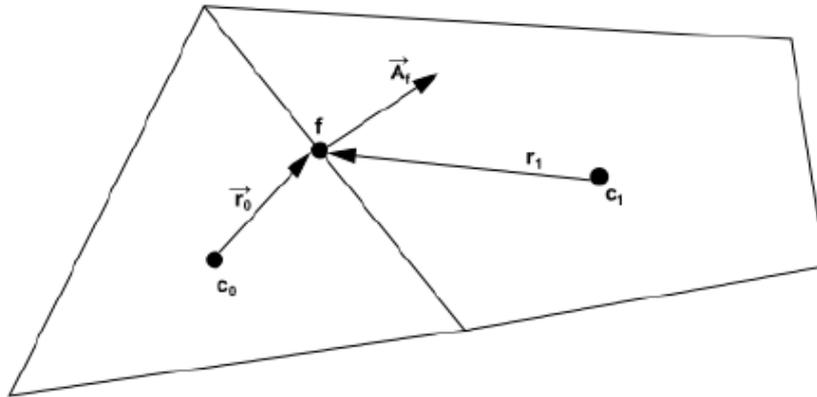
A Eq. 25 é aplicada a cada volume de controle, ou célula, no domínio computacional. A célula triangular bidimensional mostrada na Figura 18 é um exemplo de tal volume de controle. A discretização da Eq. 25 em uma determinada célula produz,

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f \phi_f \vec{v}_f \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_{\phi_f} \nabla \phi_f \vec{A}_f + S_{\phi} V \quad (26)$$

onde N_{faces} é o número de faces da célula, ϕ_f é o valor de ϕ convectado na face f e $\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V$ é definido como a discretização temporal. No cálculo em estado estacionário, as equações governantes para o solucionador baseado na pressão não contêm termos dependentes do tempo.

As equações resolvidas assumem a mesma forma geral dada acima e aplicam-se a malhas multidimensionais e não estruturadas compostas de poliedros arbitrários.

Figura 18 – Volume de controle usado para ilustrar a discretização da equação de transporte de um escalar.



Fonte: ANSYS (2013).

De acordo com o Guia teórico da ANSYS Fluent, por definição, os valores discretos do escalar ϕ são armazenados no centro da célula (C_0 e C_1 na Figura 18). No entanto, valores da face ϕ_f são requeridos para o termo convectivo na Eq.26 e deve ser interpolado partindo dos valores do centro da célula. Isso é feito usando o esquema *upwind*, no qual o valor da face ϕ_f é derivado de valores da célula a montante, isto é, contrária à direção normal da velocidade \vec{v}_f na Eq. 26.

Na abordagem *upwind* de segunda ordem (*Second order upwind - SOU*), a precisão de ordem superior é alcançada nas faces das células através de uma expansão em série de Taylor da solução centrada na célula em torno do centróide da célula. O valor nominal ϕ_f é calculado usando a seguinte expressão:

$$\phi_{f,SOU} = \phi + \Delta\phi \cdot \vec{r} \quad (27)$$

onde ϕ e $\Delta\phi$ são o valor centrado na célula e seu gradiente na célula a montante, e \vec{r} é o vetor de deslocamento do centróide da célula a montante para o centróide da face.

O solucionador das equações é baseado na pressão e emprega um algoritmo que pertence a uma classe geral de métodos chamada método de projeção (CHORIN, 1968, apud ANSYS,

2013), em que a restrição de conservação de massa (continuidade) do campo de velocidade é alcançada resolvendo a equação de pressão (ou correção de pressão).

A equação de pressão é derivada das equações de continuidade e de momento de forma que o campo de velocidade, corrigido pela pressão, satisfaça a continuidade. Como as equações governantes são não lineares e acopladas entre si, o processo de solução envolve iterações em que todo o conjunto de equações governantes é resolvido repetidamente até que a solução convirja.

Uma forma linearizada da Eq. 26 pode ser escrita como,

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (28)$$

onde o subscrito nb se refere às células vizinhas, e a_p e a_{nb} são os coeficientes linearizados para ϕ e ϕ_{nb} .

Equações semelhantes podem ser escritas para cada célula da malha, resultando em um conjunto de equações algébricas com uma matriz de coeficientes esparsa. Então, o sistema linear é solucionado por meio de um solucionador de equações lineares implícitas em conjunto com um método algébrico *multigrid*.

Devido à não linearidade do conjunto de equações, é necessário controlar a mudança de ϕ . Isso normalmente é conseguido pelo sub-relaxamento das variáveis (também conhecido como relaxamento explícito), o que reduz a mudança de ϕ produzida durante cada iteração. De uma forma simples, o novo valor da variável dentro de uma célula depende do valor antigo, ϕ_{old} , da mudança calculada em ϕ , $\Delta\phi$ e do fator de sub-relaxação, α , como segue:

$$\phi = \phi_{old} + \alpha \Delta\phi \quad (29)$$

A sub-relaxação de equações, também conhecida como relaxação implícita, é usada no solucionador baseado na pressão para estabilizar o comportamento de convergência das iterações não lineares externas, introduzindo quantidades seletivas de ϕ no sistema de equações discretizadas. Isto é equivalente ao intervalo de tempo específico do local.

A inicialização híbrida da simulação é uma coleção de fórmulas e métodos de interpolação de limites. Ela resolve a equação de Laplace para produzir um campo de velocidade que está em conformidade com geometrias de domínio complexas e um campo de pressão que conecta suavemente valores de pressão altos e baixos no domínio computacional.

Todas as outras variáveis serão corrigidas com base nos valores médios do domínio ou em uma fórmula predeterminada.

3.3.1 Modelo de turbulência

No modelo de turbulência baseado na média de Reynolds, as variáveis de solução nas equações instantâneas (exatas) de Navier-Stokes são decompostas em média (média de conjunto ou média de tempo) e componentes flutuantes. Para as componentes da velocidade:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (30)$$

onde \bar{u}_i e u'_i são os componentes médios e flutuantes da velocidade ($i = 1, 2, 3$). Da mesma forma para pressão e outras grandezas escalares.

O modelo $k - \omega$ padrão é um modelo empírico baseado na equação de transporte para a energia cinética de turbulência (k) e a taxa de dissipação específica (ω), obtidas a partir das seguintes equações:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (31)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho \omega u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (32)$$

onde G , Y e S representam, respectivamente, a geração, a dissipação e S a fonte de k e ω .

As difusividades efetivas (Γ) para k e ω são dadas pelos números turbulentos de Prandtl para k e ω , e a viscosidade turbulenta.

3.3.2 Fluxo multifásico

O modelo de Volume de Fluidos (*Volume of Fluids* – VOF) pode modelar dois ou mais fluidos imiscíveis resolvendo um único conjunto de equações de momento e rastreando a fração de volume de cada um dos fluidos em todo o domínio. Em cada volume de controle, as frações de volume de todas as fases somam a unidade. Os campos para todas as variáveis e propriedades são compartilhados pelas fases e representam valores médios de volume, desde que a fração de volume de cada uma das fases seja conhecida e cada local. Assim as variáveis e as propriedades

em qualquer célula são puramente representativas de uma das fases ou de uma mistura das fases, dependendo dos valores da fração volumétrica.

3.3.3 Teoria da malha dinâmica

O modelo de malha dinâmica pode ser usado para modelar fluxos onde a forma do domínio muda com o tempo devido ao movimento nos limites do domínio. O movimento pode ser um movimento prescrito (especificar as velocidades lineares e angulares em torno do centro de gravidade de um corpo sólido) ou um movimento não prescrito onde o movimento subsequente é determinado com base na solução no momento atual.

O solucionador de seis graus de liberdade (*Six Degrees of Freedom – 6DOF*) usa as forças e momentos do objeto para calcular o movimento angular no centro de gravidade.

O movimento angular do objeto é calculado usando coordenadas do corpo:

$$\dot{\vec{\omega}}_B = L^{-1} \left(\sum \vec{M}_B - \vec{\omega}_B \times L \vec{\omega}_B \right) \quad (33)$$

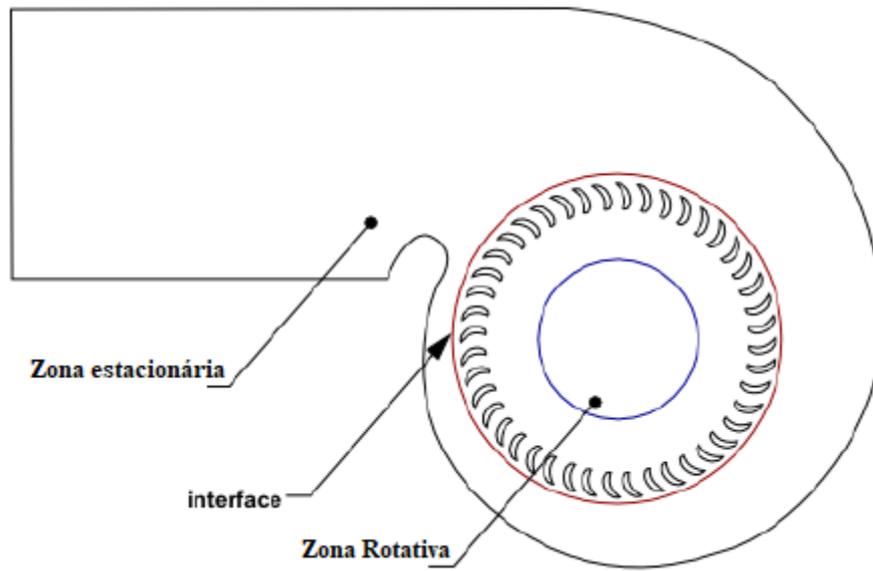
onde L é o tensor de inércia, \vec{M}_B é o vetor momento do corpo e $\vec{\omega}_B$ é o vetor velocidade angular do corpo rígido.

3.3.4 Fluxos com quadros de referência móveis

O recurso de modelagem de quadros de referência móveis do ANSYS Fluent permite modelar problemas envolvendo partes móveis, permitindo ativar quadros de referência móveis em zonas celulares selecionadas. Quando um referencial móvel é ativado, as equações de movimento são modificadas para incorporar os termos de aceleração adicionais que ocorrem devido à transformação do referencial estacionário para o referencial móvel.

Para geometrias mais complexas, pode não ser possível usar um único referencial. Nesses casos, você deve dividir o problema em múltiplas zonas celulares, com interfaces bem definidas entre as zonas. A Figura 19 – Secador de cabelo com múltiplos componentes. a seguir ilustra um secador de cabelo com a interface entre a zona estacionária (carcaça) e zona rotativa (rotor).

Figura 19 – Secador de cabelo com múltiplos componentes.



Fonte: ANSYS (2013).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Método analítico

Na análise da turbina superior (impulsiva), de acordo com a definição de torque (Eq. 9), maior este será a medida que se aumenta a distância de aplicação da força ao eixo de rotação do objeto, com isso pode-se esperar que aumentando o raio da turbina a potência de saída também aumente, pois é a relação direta entre o torque e a velocidade angular (Eq.10). Entretanto, a velocidade angular é inversamente proporcional ao raio (Eq. 34), o que leva a simplificação da Eq. 10 com a eliminação do raio, restando apenas a força aplicada e velocidade tangencial para se obter a potência (Eq. 35). Portanto, como evidenciado na Eq. 18, a maior eficiência da turbina é alcançada não aumentando o seu raio, mas reduzindo as perdas de energia nas pás e no bocal do jato d'água.

$$\omega = \frac{V}{R} \quad (34)$$

Substituindo a Eq. 33 na Eq. 10,

$$\dot{W} = \tau \omega = (F R) \left(\frac{V}{R} \right) = F V \quad (35)$$

A potência hidráulica disponível no projeto dada pela Eq. 14 é 672 W, igual para a potência máxima de saída da turbina (Eq. 12) na condição ideal (C_v , k e $\cos \theta$ são todos iguais a 1).

$$\dot{W}_{in} = P \dot{Q} = \rho g H \dot{Q} = 999 \frac{kg}{m^3} 9,8 \frac{m}{s^2} 2,5 m 0,027475 \frac{m^3}{s} = 672 W$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{max} &= A \rho C_v^3 (2 g H)^{3/2} / 2 \\ &= 2 \left(\frac{\pi}{4} \right) (0,05 m)^2 999 \frac{kg}{m^3} 1^3 \left(9,8 \frac{m}{s^2} 2,5 m 2 \right)^{3/2} = 672 W \end{aligned}$$

Na análise da turbina inferior (reativa), é possível obter a potência de saída por meio de inferência a partir do perfil de velocidades calculado com o número de circulação (Γ) (Eq. 24) e a velocidade tangencial (Eq. 22),

$$\begin{aligned}\Gamma &= 2 \pi \sqrt{(h_1 - h_2)g / \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2}\right)} \\ &= 2 \pi \sqrt{(0,58 \text{ m}) 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} / \left(\frac{1}{(0,6\text{m})^2} - \frac{1}{(0,05\text{m})^2}\right)} \\ &= 0.7512 \text{ m}^2/\text{s}\end{aligned}$$

$$v_{\theta}(0,05 \text{ m}) = \frac{\Gamma}{2 \pi r} = \frac{0.7512 \text{ m}^2/\text{s}}{2 \pi 0,05 \text{ m}} = 2,4 \text{ m/s}$$

Sendo a velocidade tangencial do vórtice no orifício de saída de 2,4 m/s e considerando que ao atingir a turbina, a velocidade tangencial da água seja reduzida para 1,2 m/s, a Eq.8 fornece 33 N de força sobre a turbina, que multiplicado pela velocidade de 1.2 m/s considerada para a turbina (Eq. 35), obtém-se 39,5 W de potência.

$$F = \dot{Q} \rho \Delta V = 0,027475 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} 999 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (2,4 - 1,2) \frac{\text{m}}{\text{s}} = 33 \text{ N}$$

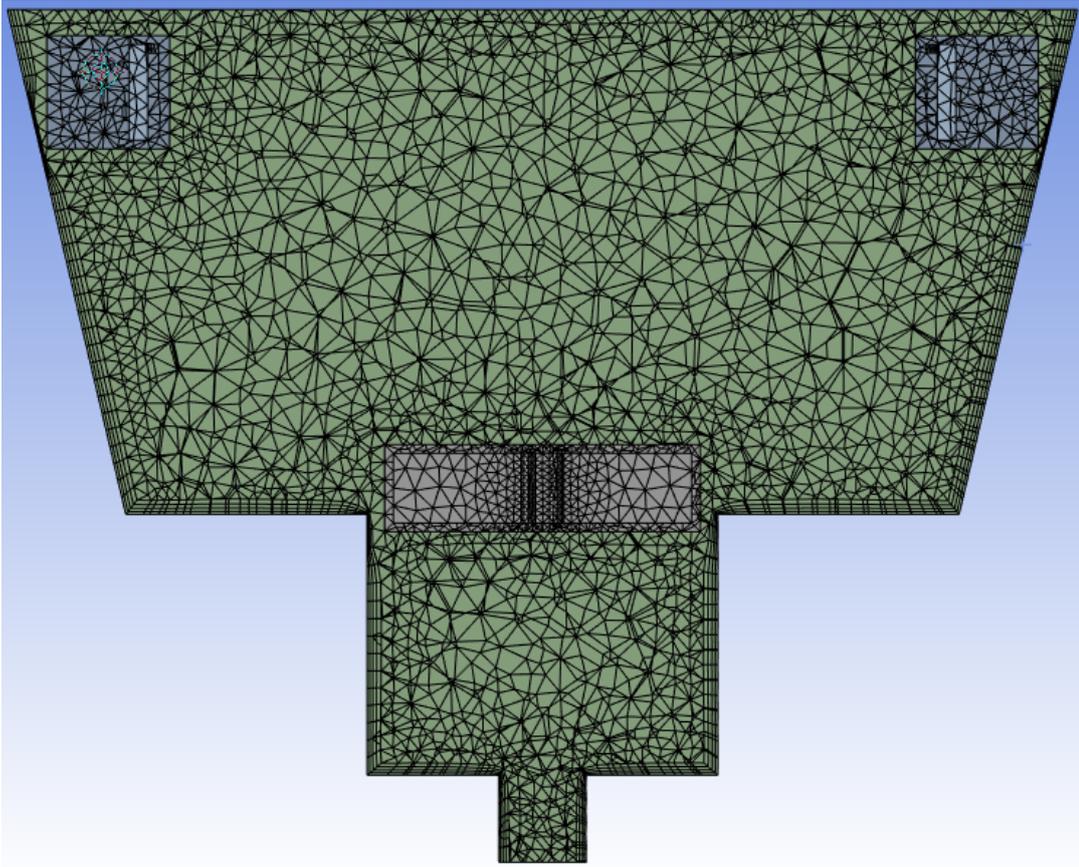
$$\dot{W} = F V = 33 \text{ N} 1,2 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 39,5 \text{ W}$$

4.2 Método numérico

Na simulação computacional, para análise do escoamento em uma THVG foi utilizada uma malha com 366 283 células, tetraédricas em maioria (Figura 21). As condições de contorno foram de duas entradas de água a 7 m/s através da tubulação de 2 pol, e saídas no topo e no fundo do tanque abertos a pressão atmosférica (Figura 23). Na parede foi utilizada condição de não escorregamento. A aceleração gravitacional usada foi de 9,81 m/s².

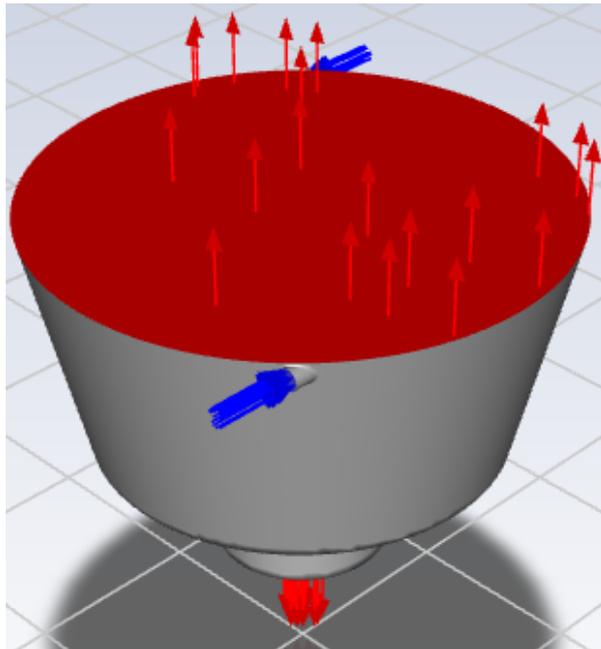
O modelo multifásico foi o de Volume de fluidos (VOF) e contém as fases água e ar com coeficiente de tensão de superfície constante de 0,072 N/m. O modelo de turbulência foi o SST k- ω com o *upwind* de segunda ordem. A inicialização utilizada foi a híbrida com o tanque preenchido com água.

Figura 20 – Disposição da malha na vista em secção da THVG.



Fonte: autoria própria.

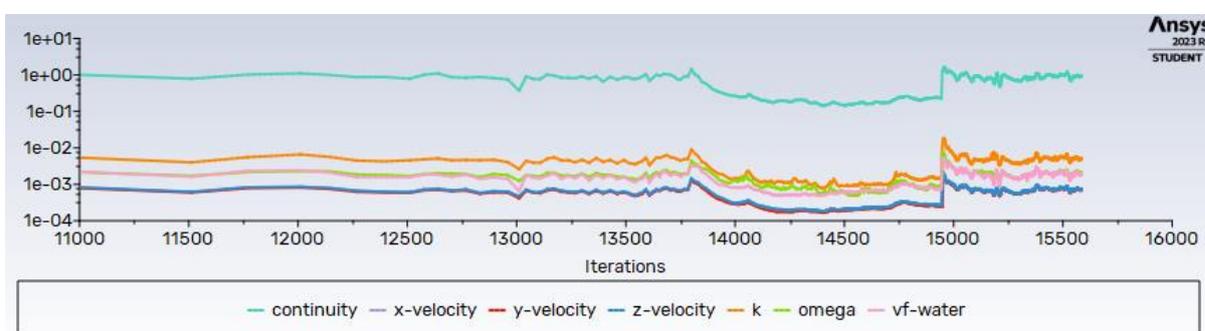
Figura 21 – Condições de contorno.



Fonte: autoria própria.

O solucionador foi definido como baseado na pressão e em regime permanente. Porém, o regime permanente não foi alcançado, apesar de os valores residuais para as velocidades, parâmetros de turbulência e fração de fluidos terem se mantido baixo e estáveis, abaixo de 0,01 (Figura 22). O valor residual da continuidade ficou alto, em torno de 1, no entanto, de 11000 até 13750 iterações e de 15000 até o fim, o campo de volume de fluido não alterou mais, resultando na forma apresentada na Figura 23 – Perfil de fração de fluidos. Água em azul, ar em vermelho..

Figura 22 – Valores residuais da iteração das equações governantes.

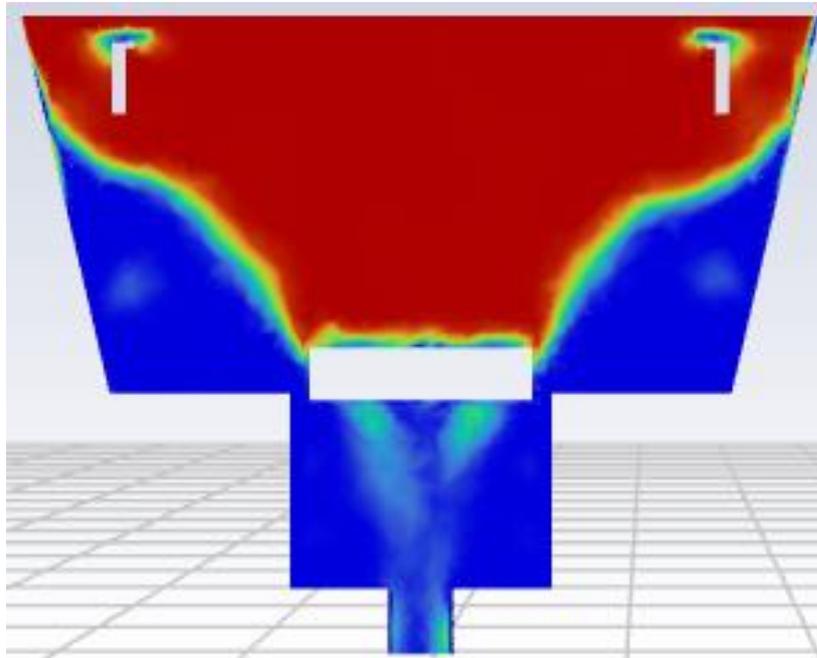


Fonte: autoria própria.

A Figura 23 – Perfil de fração de fluidos. Água em azul, ar em vermelho. apresenta os isovalores dos fluidos na vista em secção do tanque com a formação do vórtice (em azul a água e em vermelho o ar). A água que circula no tanque tende a se acumular na parede devido a inércia do movimento e ao colidir com o rotor inferior o vórtice é deformado, deixando de apresentar o núcleo de ar, mas mantendo a movimentação da água em circulação. Esse perfil não foi alterado significativamente com mais iterações, o que mostra que um regime permanente pode ser obtido com as condições de entrada e saída utilizadas.

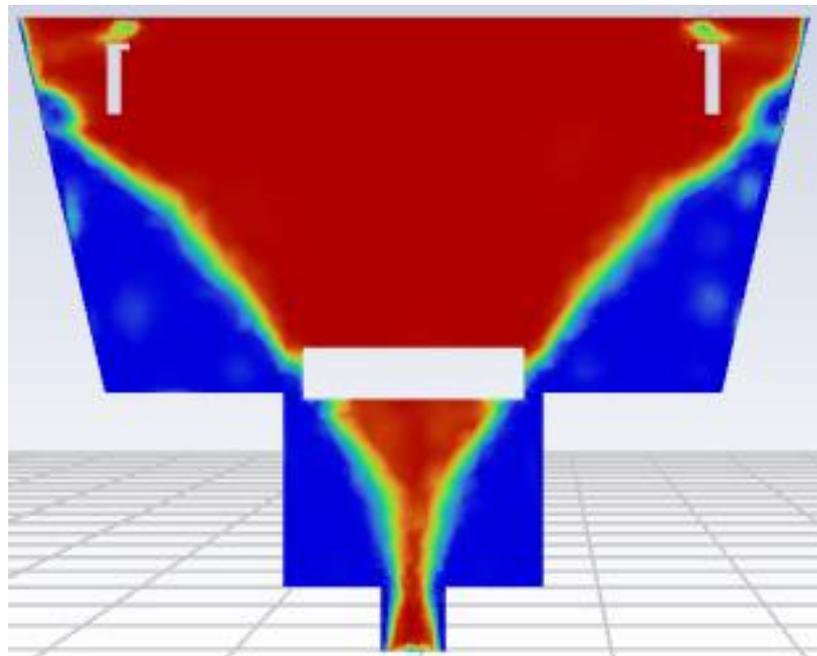
Duas perturbações nas linhas do gráfico na Figura 22 ocorreram entre as iterações 13750 e 14000, e 14750 e 15000. A primeira perturbação foi devido a mudança na configuração da turbina inferior para girar em uma determinada rotação, a fim de casar o giro da água em vórtice ao giro do rotor e se obter o torque resultante. Porém, essa técnica não funcionou, pois, como explicado na teoria fluxo com quadro de referências móveis (subitem 3.3.4), termos de aceleração adicionais são incorporados ao equacionamento, ou seja, o rotor adiciona mais energia ao sistema. Isto pode ser observado pelo do perfil de fração de fluidos na Figura 24 com a água sendo expelida para as paredes. O que foge da realidade. A segunda perturbação é devido a retirada da rotação imposta, voltando a girar livre sob efeito da água.

Figura 23 – Perfil de fração de fluidos. Água em azul, ar em vermelho.



Fonte: autoria própria.

Figura 24 – Perfil de fração de fluidos. Água sendo acelerada pelo rotor.

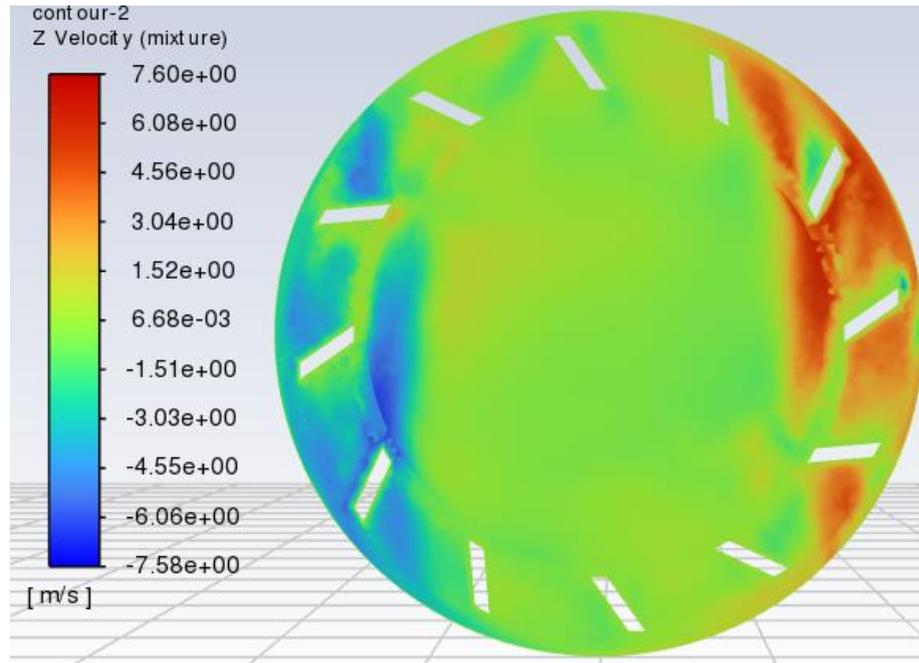


Fonte: autoria própria.

Como os jatos d'água incidem na turbina superior em lados opostos e direções contrárias, fica evidente na Figura 25, a incidência e o espalhamento da água ao colidir com as pás da

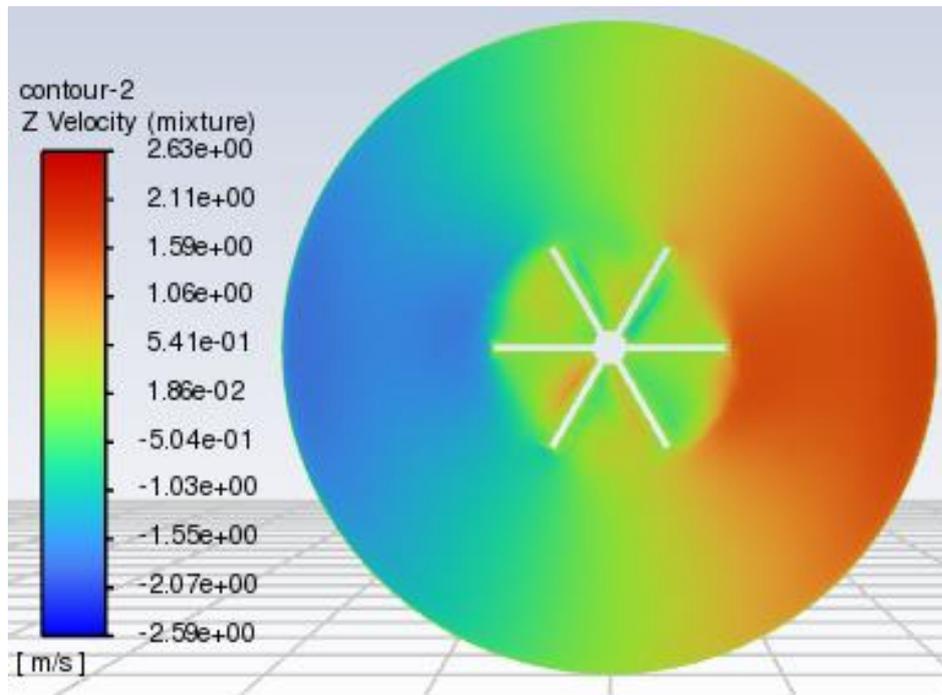
turbina. A Figura 26 mostra que a circulação da água se estende até o rotor inferior. Na Figura 27 – Perfil de velocidade tangencial., do perfil de velocidade relativa ao eixo Z no plano XY (velocidade tangencial relativa à circulação), o movimento de circulação da água no tanque se estende até a saída na parte inferior.

Figura 25 – Vista superior em corte. Velocidades na região do rotor superior.



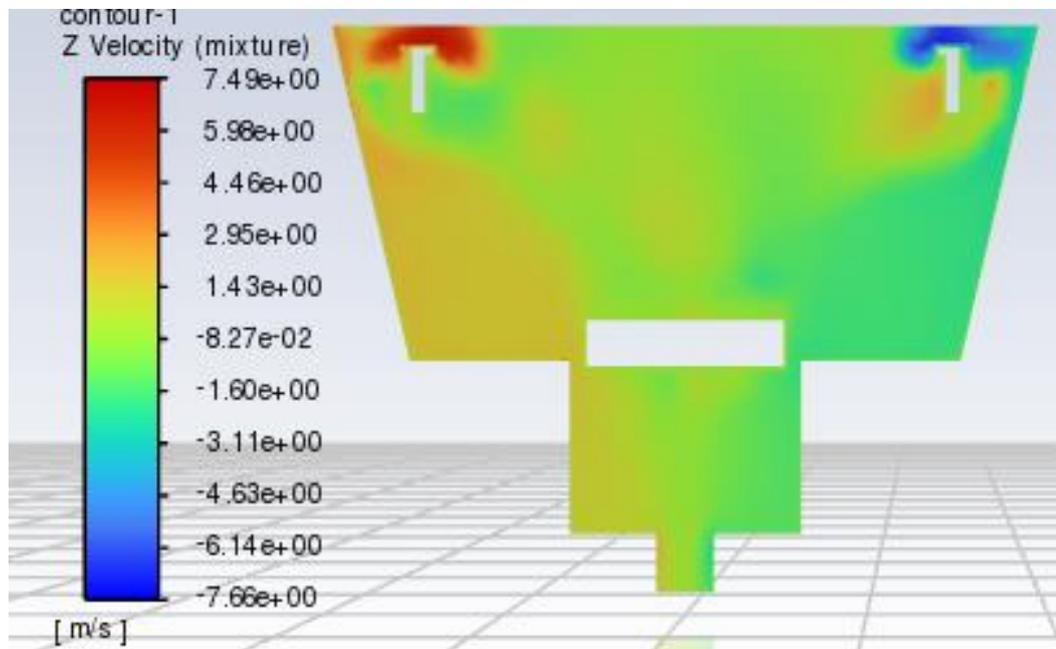
Fonte: autoria própria.

Figura 26 – Vista superior em corte. Velocidades na região do rotor inferior.



Fonte: autoria própria.

Figura 27 – Perfil de velocidade tangencial.

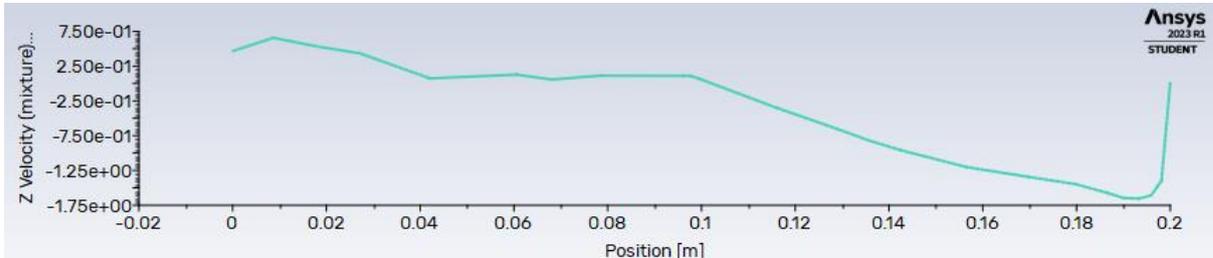


Fonte: autoria própria.

É possível constatar no gráfico da velocidade tangencial na região do rotor inferior (Figura 28 – Perfil de velocidade relativa ao eixo z. Figura 28) que na extremidade da turbina a água circula numa velocidade de aproximadamente 1,5 m/s e, ao centro da turbina, essa velocidade tende a

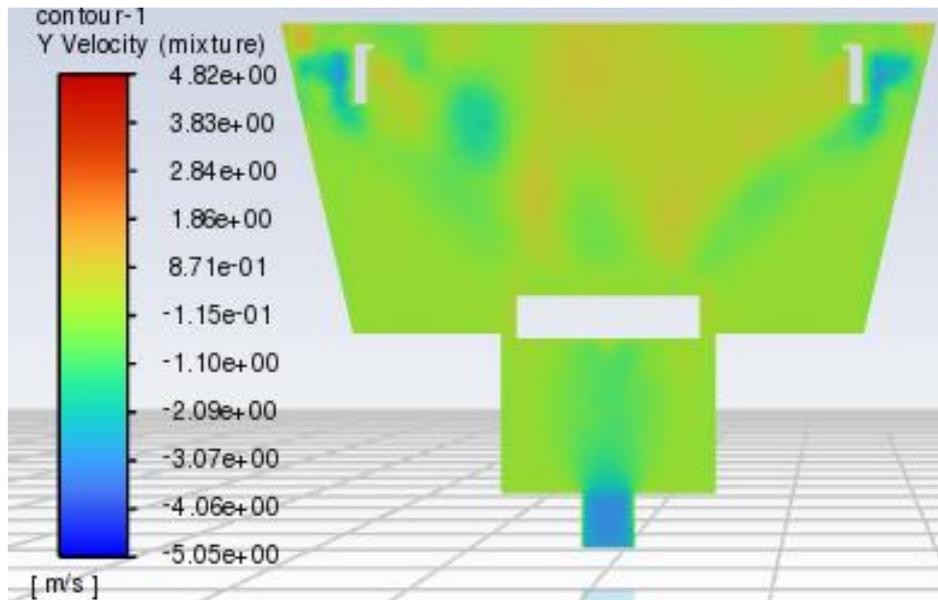
diminuir devido a iteração com o rotor, resultando num aumento da velocidade em Y, como se pode observar na Figura 29.

Figura 28 – Perfil de velocidade relativa ao eixo Z.



Fonte: autoria própria.

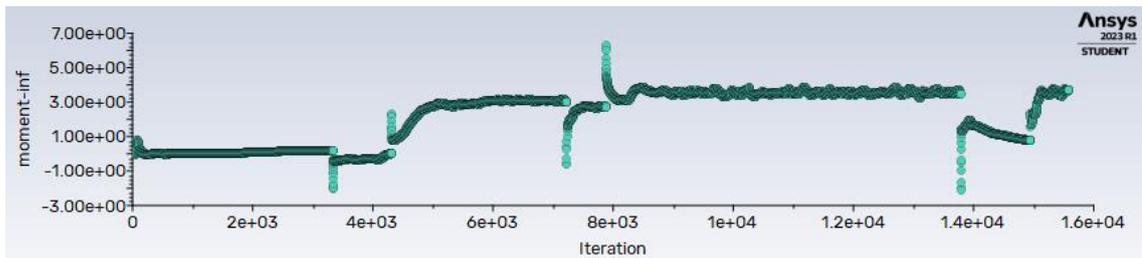
Figura 29 – Perfil de velocidade relativa ao eixo Y.



Fonte: autoria própria.

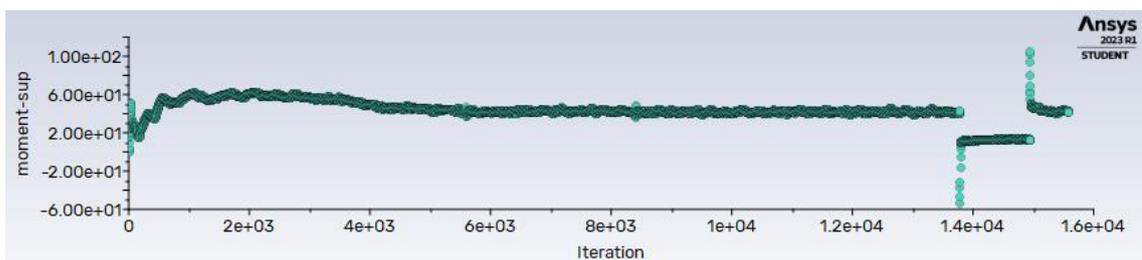
Os valores de momento atuando no eixo das turbinas foi de 40 N.m na turbina superior (Figura 30) e 3,5 N.m na turbina inferior (Figura 31) – as descontinuidades nas linhas dos gráficos é em razão de mudanças na velocidade angular das turbinas para testes. No entanto, esse é o momento provocado pela força de arrasto sobre as turbinas girando livre. Não foi possível determinar o momento resultante da reação da água com as turbinas caso uma carga fosse aplicada ao eixo, nem a velocidade que estão girando. Entretanto, é possível fazer inferências sobre os valores e estimar a potência desenvolvida pelas turbinas.

Figura 30 – Momento na turbina superior ao longo das iterações.



Fonte: autoria própria.

Figura 31 – Momento na turbina inferior ao longo das iterações.



Fonte: autoria própria.

Como a turbina superior tem 1 m de diâmetro (no ponto médio) e recebe os jatos de 7 m/s, caso a turbina gire com essa mesma velocidade, sua velocidade angular seria 14 rad/s. Adotando metade dessa velocidade angular (7 rad/s) – a ideia de reduzir a velocidade à metade deriva da condição para potência máxima da turbina impulsiva na análise teórica – e mantendo o momento de 40 N.m, a potência fornecida seria de 280 W.

A turbina inferior tem 0,38 m de diâmetro e o vórtice ao seu redor gira numa velocidade de 1,5 m/s, resultando em 7,9 rad/s. Adotando metade dessa velocidade angular (4 rad/s) e mantendo o momento de 3,5 N.m, a potência fornecida seria de 14 W.

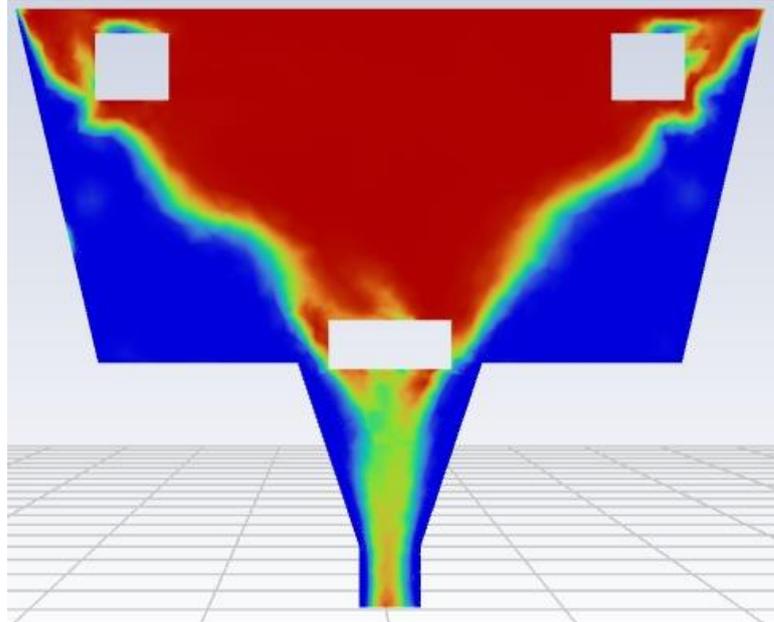
Somando as potências fornecidas, estima-se que a eficiência desenvolvida pela turbina seja de 44%.

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{W}_{in}} = \frac{280 \text{ W} + 14 \text{ W}}{672 \text{ W}} = 0,4375$$

Outra geometria do tanque utilizada nas simulações, anterior a geometria apresentada, consistiu em afunilar o balde com a intenção de ajudar a formação do vórtice, como foi feito em outras pesquisas. No entanto, o momento sobre a turbina inferior foi de 1,5 N.m. A Figura 32 mostra a fração de fluidos e pode-se notar que a água percola a parede do funil do balde e

não atinge a turbina como deveria. Por isso, optou-se por não afunilar o balde. Entretanto, como não foi possível aplicar a carga ao eixo do rotor, não é possível afirmar a ineficiência do afunilamento.

Figura 32 – Perfil de fração de fluidos no tanque afunilado. Água em azul, ar em vermelho.



Fonte: autoria própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A THVG é uma tecnologia que vem sendo pesquisada e está em desenvolvimento para alcançar maior eficiência. As THVG já implementadas variam em relação a vazão e queda, e dentre as que se aproximam nesses parâmetros, a eficiência pode ser diferente.

A primeira construída, e única que possui vazão menor que 500 l/s, tem a vazão de 50 l/s e queda de 0,8 m, produzindo 200 W, ou seja, 51% de eficiência. Este valor é próximo ao encontrado, de 44%, porém com vazão de 25 l/s e queda de 2,5m. Portanto, é possível esperar um bom desempenho de um protótipo com geometrias simples, podendo ter melhor desempenho caso parâmetros construtivos das turbinas sejam analisados e melhorados individualmente, como tem sido feito nas pesquisas sobre o assunto.

Os métodos analíticos abordados neste trabalho adotam uma quantidade de considerações de simplificadoras que, somadas à complexidade do movimento dos fluidos e sua interação com as turbinas, torna praticamente inviável o estudo por esse meio. Porém, foi uma boa base para a compreensão do fenômeno e seus parâmetros e equações envolvidas.

A simulação computacional permitiu analisar o desenvolvimento da solução ao passo que as iterações aconteciam, o que possibilitou ajustar parâmetros geométricos para obter melhores resultados. No entanto, também não foi possível obter a potência gerada devido às limitações do software.

Em razão do curto tempo disponível para as simulações e da pequena capacidade computacional disponível poucas variações puderam ser testadas na geometria e condições de contorno da THVG. O pacote estudantil da ANSYS tem limite para o número de elementos na malha, o que reduz a acurácia dos resultados e a convergência da simulação.

A experimentação de um protótipo da THVG foi proposta inicialmente neste trabalho, porém, em razão de atrasos durante as simulações – causados por divergência nas iterações depois de muitas iterações, quedas de energia e o próprio aprendizado sobre o software – não houve tempo suficiente para busca de apoio financeiro para a compra dos materiais.

Para trabalhos futuros sugere-se fazer simulações no regime transiente, variações na geometria do tanque e da turbina, implementar no software uma maneira de introduzir carga ao eixo das turbinas afim de aproximar a simulação a realidade do fenômeno, e a experimentação para validar o estudo analítico e numérico.

REFERÊNCIAS

ANSYS. Fluent Theory Guide, Release 15.0. 2013.

AHN, Soo-Hwang et al. Numerical prediction on the effect of free surface vortex on intake flow characteristics for tidal power station. **Renewable Energy**, v. 101, p. 617–628, February 2017.

AZARPIRA, Maryam; ZARRATI, Amir R. **A 3D analytical model for vortex velocity field based on spiral streamline pattern**. [S.l.]: Elsevier BV. September 2019. p. 244–252.

CAMPOS, Pedro H. F. **Otimização do Planejamento da Operação Hidro-energética Para O Curto Prazo**. Universidade Federal de Minas Gerais - Pós Graduação em Engenharia and Elétrica. [S.l.]: [s.n.]. 2022.

CHORIN, Alexandre Joel. **Numerical solution of the Navier-Stokes equations**. *Mathematics of computation*, v. 22, n. 104, p. 745-762, 1968.

DHAKAL, Sagar et al. Comparison of cylindrical and conical basins with optimum position of runner: Gravitational water vortex power plant. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 662–669, August 2015.

DOMFEH, Martin K. et al. Numerical simulation of an air-core vortex at a hydraulic intake using OpenFOAM. **Scientific African**, v. 8, p. e00389, July 2020.

EDIRISINGHE, D. S. et al. **Numerical Optimization of Gravitational Water Vortex Turbine using Computational Flow Analysis**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. [S.l.]: IOP Publishing. June 2022. p. 012004.

G. CUSSINS LTD. Pelton Wheel Water Turbine. **Rochester Institute of Technology**. Disponível em: <<https://people.rit.edu/rfaite/courses/tflab/Cussons/pelton/pelton.htm>>. Acesso em: 04 dez. 2022.

GÖRTZ, J. et al. Assessment of pumped hydropower energy storage potential along rivers and shorelines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 165, p. 112027, September 2022.

GUZMÁN, Vladimir J. A.; GLASSCOCK, Julie A.; WHITEHOUSE, Ferris. Design and construction of an off-grid gravitational vortex hydropower plant: A case study in rural Peru. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 35, p. 131–138, October 2019.

IEA. **World Energy Outlook 2022**. [S.l.]: OECD. October 2022.

LUGAUER, Florian Julian; KAINZ, Josef; GADERER, Matthias. Techno-economic efficiency analysis of various operating strategies for micro-hydro storage using a pump as a turbine. **Energies**, v. 14, n. 2, p. 425, 2021.

MULLIGAN. **Experimental and Numerical Analysis of Three-Dimensional Free-Surface Turbulent Vortex Flows with Strong Circulation**. [S.l.]: [s.n.]. 2015.

MULLIGAN, Sean; SHERLOCK, Richard; CASSERLY, John. **Experimental and Numerical Modeling of Free-Surface Turbulent Flows in Full Air Core Water Vortices**. [S.l.]: [s.n.]. 2020.

ONU ODS 7. **Sustainable Development Goal - United Nations**. Disponível em: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/>>. Acesso em: 02 nov. 2022.

POWALLA, Dennis et al. **A Computational Fluid Dynamics Model for a Water Vortex Power Plant as Platform for Etho- and Ecohydraulic Research**. [S.l.], p. 639. 2021.

SALEEM, Abdul S. et al. Parametric study of single-stage gravitational water vortex turbine with cylindrical basin. **Energy**, v. 200, p. 117464, June 2020.

SAVIS GOHARI KRANGSÅS, Thaleia K. S. S. M. L. E. G. B. P. T. A. L. M.; MAAS, Nienke. **Positive Energy Districts: Identifying Challenges and Interdependencies**. [S.l.]: MDPI AG. September 2021. p. 10551.

SIERRA, Jorge et al. Review: Gravitational Vortex Turbines as a Renewable Energy. **International Journal of Fluid Machinery and Systems**, v. 13, p. 704–717, December 2020.

SILVA, Poliana. **ESTUDO DE COMPARTILHAMENTO DE CARGA ENTRE MÚLTIPLAS FONTES RENOVÁVEIS COMPONDO UMA MICRORREDE CC**. [S.l.]: [s.n.]. 2018.

SRIHARI, P. S. V. V. et al. **Experimental study on vortex intensification of gravitational water vortex turbine with novel conical basin**. 2019.

ULLAH, Rizwan et al. Preliminary experimental study on multi-stage gravitational water vortex turbine in a conical basin. **Renewable Energy**, v. 145, p. 2516–2529, January 2020.

URSIN GSTÖHL, Stefan P. **Energy self-sufficient households with photovoltaics and electric vehicles are feasible in temperate climate**. [S.l.], p. e0227368. 2020.

VELÁSQUEZ, L.; CHICA, E.; POSADA, J. Advances in the Development of Gravitational Water Vortex Hydraulic Turbines. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, v. 14, p. 1–14, 2021.



CÓPIA DO TRABALHO Nº 226/2023 - DELMAX (11.57.05)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 20/12/2023 14:41)

DIEGO ALVES DE MORO MARTINS
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matrícula: ###578#4

(Assinado digitalmente em 18/12/2023 12:59)

RENATO AFONSO RIBEIRO
DISCENTE
Matrícula: 2019#####1

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: 226, ano: 2023, tipo:
CÓPIA DO TRABALHO, data de emissão: 18/12/2023 e o código de verificação: 2b7f76d966