

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

FELIPPE MONTEIRO CAMARGO NEVES

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM APARATO EXPERIMENTAL DE
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO UMA TURBINA TESLA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

FELIPPE MONTEIRO CAMARGO NEVES

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM APARATO EXPERIMENTAL DE GERAÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO UMA TURBINA TESLA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica, do
Departamento Acadêmico de
Mecânica, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Me. Marcos Vinicius
Barbosa

PONTA GROSSA

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM APARATO EXPERIMENTAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO UMA TURBINA TESLA

por

FELIPPE MONTEIRO CAMARGO NEVES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 28 de junho de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne
Presidente da Banca Examinadora

Prof. Dr. Gilberto Zammar
Membro Titular

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho
Coordenador do Curso

Dedico este trabalho á minha família, pela distância e pelos momentos em que não pude estar presente, para vocês todo meu amor. Para minha avó e meu avô que me acompanharam, mas que tiveram de partir antes desse momento, todo meu amor.

Resumo

NEVES, Felipe Monteiro Camargo Neves. **Projeto e construção de um aparato experimental de geração de energia elétrica utilizando uma turbina Tesla.** 2018. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

Este trabalho descreve um sistema para geração de energia elétrica, utilizando uma turbina Tesla em pequena escala, como uma alternativa para o desenvolvimento de novas técnicas para a demanda em energia elétrica nacional. O objetivo é projetar e construir um protótipo de uma turbina Tesla utilizando como fluido de trabalho vapor de água, para que neste, seja feita a comparação do projeto e da turbina real, testando em conjunto sua eficiência térmica e a potência gerada. Como base a metodologia utilizada, foi, primeiramente calcular a área do bocal de entrada da turbina e a espessura da camada limite para definir as distâncias entre os discos a fim de definir os parâmetros para construção, em seguida, calculou-se o torque e a potência do projeto. Dessa forma, construiu-se a turbina Tesla com os dados referente ao projeto e os comparou em testes experimentais para validação utilizando um pequeno gerador de energia elétrica, que gerou 2,37 W de potência. A partir dos testes realizados em bancada, pode-se concluir que apesar das perdas acumuladas no sistema, pode-se obter resultados satisfatórios para validação dos cálculos de projeto, e para geração de energia elétrica utilizando uma turbina Tesla.

Palavras-chave: Turbina Tesla. Camada limite. Geração de energia elétrica.

Abstract

NEVES, Felipe Monteiro Camargo. **Design and construction of an experimental apparatus for electric energy generation using a Tesla turbine.** 2018. 50 p. (Bachelor's Degree in Mechanical Engineering) - Federal University of Technology - Paraná. Ponta Grossa, 2018.

This paper describes a system for electric energy generation, using a Tesla turbine in a small scale, as an alternative to the development of new techniques to supply the national electric energy demand. The objective is to project and build a prototype of a Tesla turbine using water vapor as working fluid, so then a comparison between the project and the real turbine can be made, testing its thermal efficiency and potency generated as well. The methodology used as basis was, firstly, to calculate inlet nozzle area of the turbine and the boundary layer to define the distances between the discs in order to define the parameters for building. Following, the torque and project potency were calculated. This way, a Tesla turbine was build with the data referring to the project and compared with experimental tests for validation using a small electric energy generator, which generated 2,37 W of potency. From these tests made in stand, it can be concluded that despite the accumulated losses on the system, satisfactory results can be obtained for project calculating validation, and to electric energy generation using a Tesla turbine.

Key Words: Tesla Turbine. Boundary layer. Electric power generation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Turbina modificada Tesla-Pelton.....	13
Figura 2 - Turbina Tesla modificada com pás	14
Figura 3 - Principais componentes de uma Termoelétrica	16
Figura 4 - Diagramas termodinâmicos para o Ciclo Rankine Ideal: (a) T-S; (b) P-V .	17
Figura 5 - Esquema de funcionamento de uma caldeira Aquatubular e seus principais fluxos de massa e energia	18
Figura 6 - Turbina Tesla	20
Figura 7 - Esquema de operação de uma turbina Tesla	21
Figura 8 - Bomba múltiplo estágio.....	23
Figura 9 - Unidade térmica geradora de vapor.....	30
Figura 10 - Montagem da turbina Tesla explodida	36
Figura 11 - Componentes da turbina Tesla. a) pás; b) eixo; c) corpo da turbina.....	37
Fotografia 1 - Painel de pressão	31
Fotografia 2 - Motor da marca Fountain 5,6 V.....	32
Fotografia 3 - Manômetro	33
Fotografia 4 - Válvula de controle de fluxo	33
Fotografia 5 - Sistema para testes do projeto da turbina Tesla	35
Fotografia 6 - Turbina Tesla e seus componentes	36
Fotografia 7 - Montagem turbina Tesla	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1 TERMOELÉTRICA.....	15
3.1.1 Ciclo Rankine Ideal.....	17
3.1.2 Caldeira	18
3.1.3 Turbina a vapor.....	19
3.1.3.1 Critérios para classificação de turbinas.....	19
3.1.3.2 Turbina tesla	20
3.1.4 Condensador	22
3.1.5 Bomba	22
4 METODOLOGIA.....	24
4.1 PROJETO TURBINA TESLA	24
4.1.1 Cálculo do Bocal.....	24
4.1.2 Calculo da Espessura da Camada Limite Laminar	25
4.1.3 Calculo da Espessura da Camada Limite Turbulenta.....	26
4.1.4 Calculo da Potência da Camada Limite Turbulenta.....	27
4.2 RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	27
4.3 PRIMEIRA E SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA.....	28
4.3.1 Cálculo do Trabalho Realizado Por uma Turbina	29
4.3.2 Cálculo da Energia Térmica Gerada em uma Caldeira.....	30
4.3.3 Cálculo da Eficiência Térmica.....	30
4.4 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	31
4.4.1 Caldeira	31
4.4.2 Gerador.....	32
4.4.3 Manômetro.....	33
4.4.4 Válvula.....	33
5 RESULTADO E DISCUSSÕES.....	34
5.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA CONSTRUÍDO	35
5.1.1 Turbina Tesla	35
5.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO.....	38
5.2.1 Perda de Carga.....	38
5.2.2 Potência da Turbina Tesla	40
5.2.3 Eficiência Térmica.....	40
5.2.4 Resumo dos Cálculos da Análise de desempenho.....	41
6 CONCLUSÃO.....	43
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	43
REFERÊNCIAS.....	45

ANEXO A – PROPRIEDADES DO VAPOR SATURADO	47
ANEXO B – PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA ÁGUA SATURADA.....	49
ANEXO C – DIAGRAMA DE MOODY	50

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica, causada pelo consumo elevado para o desenvolvimento econômico, social e tecnológico, desafia a criação de novas técnicas e meios de produção para obtenção de eletricidade. A estimativa de consumo para os países latino-americanos para o ano 2020 é de aproximadamente 1,9 milhões de GWh, crescendo a uma taxa de 4% a 5% ao ano; isto é, aproximadamente 12 GW por ano (BOHORQUEZ, 2007). Para atender tal exigência, a atual matriz energética utiliza como principais capacidades de potência usinas hidrelétricas, termoeletricas, nuclear, entre outras.

Em 2015, as usinas termoeletricas tiveram uma participação de 34,4% da energia total gerada no Brasil, comparado a 2014, houve uma diminuição de 2%, porém, as capacidades instaladas tiveram um aumento de 37.827 MW para 39.564 MW, sendo a maior parte foi gerada por usinas termoeletricas de gás natural, e a menor parte por Usinas Nucleares (EPE, 2016).

As usinas termoeletricas podem ser construídas de diversas maneiras dependendo do combustível utilizado para a geração de vapor (CENGEL; BOLES, 2002). Porém, essas usinas trabalham com disposições de planta similares, sendo dividida em quatro subsistemas: caldeira, turbina a vapor, condensador e bomba de água.

Motivado pela crescente demanda de energia elétrica e meios de produção cada vez mais eficientes, o presente trabalho visa apresentar conceitos desenvolvidos por Nikola Tesla, inventor Croata, que desenvolveu uma turbina de baixo custo e construção simples, que pode gerar energia de forma eficiente.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é projetar e construir um aparato experimental utilizando vapor como fluido de trabalho para gerar energia elétrica utilizando uma turbina Tesla. E comparar o projeto com a turbina real que será construída conforme dados calculados, verificando a potência projetada da potência real. Analisando em conjunto a eficiência térmica da turbina.

Para o desenvolvimento do projeto será analisado a pressão máxima do gerador de vapor, a vazão de vapor e os dados para construção da turbina Tesla. Em conjunto será analisado conceitos relacionados a termodinâmica, utilizando conceito relacionado a ciclo termodinâmico simples, a fim de aprofundar os conhecimentos para aplicações em termoelétricas

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentados alguns trabalhos considerados mais relevantes na área do presente estudo e que serviram de base para o desenvolvimento deste trabalho.

Alguns princípios de operação de uma turbina Tesla são comuns a todos os trabalhos desenvolvidos, como o efeito da camada limite, que estabelece uma condição de aderência do fluido à superfície, ou seja, o fluido imediatamente em contato com o corpo vai desacelerar até que atinja a velocidade do mesmo. Porém, alguns fatores de projeto os diferem, tais como: o fluido de trabalho, o formato dos discos, as dimensões e a faixa de operação.

Rey Ladino (2004) trabalhou em uma modelagem computacional, utilizando como base os parâmetros de camada limite, laminar e turbulenta. A partir desses dados, ele utilizou um programa de dinâmica dos fluidos computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*), para simular uma turbina em diferentes situações, variando o diâmetro dos discos e a espessura da camada limite. Nas discussão ele conclui que os efeitos da camada limite turbulenta gera o dobro de torque, comparado com a camada limite laminar, aumentando a eficiência da turbina.

Couto, Duarte e Bastos Netto (2006) revisaram os cálculos de projeto de uma turbina tesla e puderam afirmar que a camada limite laminar (δ_l) e turbulento (δ_t), podem ser descritas pelas seguintes relações, respectivamente:

$$\delta_l = 5 \sqrt{\frac{v\pi D}{V}} \quad (1)$$

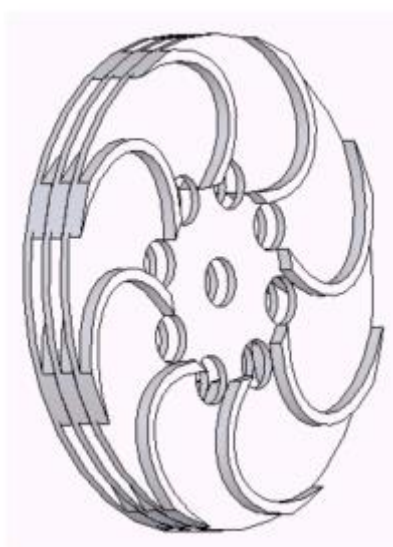
$$\delta_t = 0,526r \left(\frac{v}{r^2\omega} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (2)$$

Sendo para camada laminar, (πD) o perímetro do disco, (v) a viscosidade cinemática do fluido de trabalho e V a velocidade do fluido. Para camada turbulenta ainda temos os parâmetros referente ao (r) raio do disco e (ω) velocidade angular. As expressões propostas por Couto, Duarte e Bastos Netto (2006) são usadas também para o cálculo do projeto no trabalho desenvolvido por Batista (2009). Tais

parâmetros foram estudados primeiramente por Schlichting (1962) em seu livro "*Boundary-Layer Theory*", no qual é descrito o comportamento da camada limite em discos cilíndricos.

Batista (2009) estudou experimentalmente e por meio de simulações computacionais os efeitos da fusão de uma turbina Tesla com uma turbina Pelton, denominada Tesla-Pelton. Em seus estudos o mesmo, propôs uma micro geração de energia elétrica até 5 kW utilizando vapor, modificando os discos lisos para obter maior torque, juntando as forças de cisalhamento viscoso da camada limite com as forças de pressão exercida pelo fluido sobre a área do ressalto colocados nos discos. Os ressaltos foram construídos em forma de elipse, formando cavidades ou dutos por onde escoa o fluido, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Turbina modificada Tesla-Pelton



Fonte: Batista (2009)

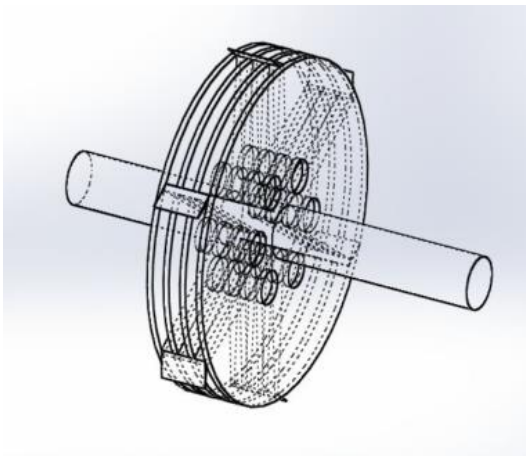
Para o dimensionamento do projeto, Batista (2009) utilizou-se de conceitos descritos anteriormente por Schlichting (1962), para o desenvolvimento dos cálculos e parâmetros de construção como: espessura das camadas limites laminar e turbulenta, e dados de torque exercido sobre os componentes.

Em comparação dos cálculos com os dados reais de experimentos, Batista (2009) concluiu que a turbina Tesla possuía características de camada limite turbulenta e que os dados adquiridos com os cálculos são razoavelmente satisfatórios

para o projeto real, o mesmo ainda pontua que a modificação da turbina Tesla para turbina Tesla-Pelton atingiu o dobro do rendimento de uma turbina Tesla com discos lisos.

Seguindo a linha de pesquisa similar a Batista (2009), porém, utilizando como fluido de trabalho água, Khan et al. (2013) realizaram estudos sobre a utilização de uma turbina Tesla em uma micro hidroelétrica. No desenvolvimento desse estudo, os pesquisadores desenvolveram uma turbina que possui pás soldadas aos discos lisos, como mostra a Figura 2. Essa modificação gerou um aumento do torque e melhorou o direcionamento da água para os orifícios localizados perto do eixo, aumentando o fluxo e coletando assim um volume maior de água. A turbina desenvolvida por Khan et al. (2013) pode ser utilizada para suprir a demanda de micro geração de energia em comunidades rurais, podendo ser instalada em rios e canais, gerando energia de forma limpa e sustentável.

Figura 2 - Turbina Tesla modificada com pás



Fonte: Khan, M. Usman Saeed (2013)

Além dos estudos para cálculo de características da turbina, é necessário a análise dos materiais utilizados, sendo assim, Rocha, Guimarães e Placco (2013) utilizam a carta de Ashby, que permite identificar dentre alguns materiais um subconjunto que possua ótimas características de aplicação. Nesse trabalho, eles descrevem a utilização de um eixo com elevada rigidez, indicando o uso de aços inoxidáveis pela sua resistência mecânica e a corrosão.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, é apresentada uma visão geral sobre termelétricas. Geralmente, a geração de energia por usinas termoelétricas que operam utilizando o vapor, envolve a aplicação de ciclos termodinâmicos. O Ciclo Rankine é o ciclo termodinâmico mais simples para a geração de vapor, sendo explicado em detalhes nas seções a seguir, bem como os principais componentes envolvidos no ciclo são apresentados.

3.1 TERMOELÉTRICA

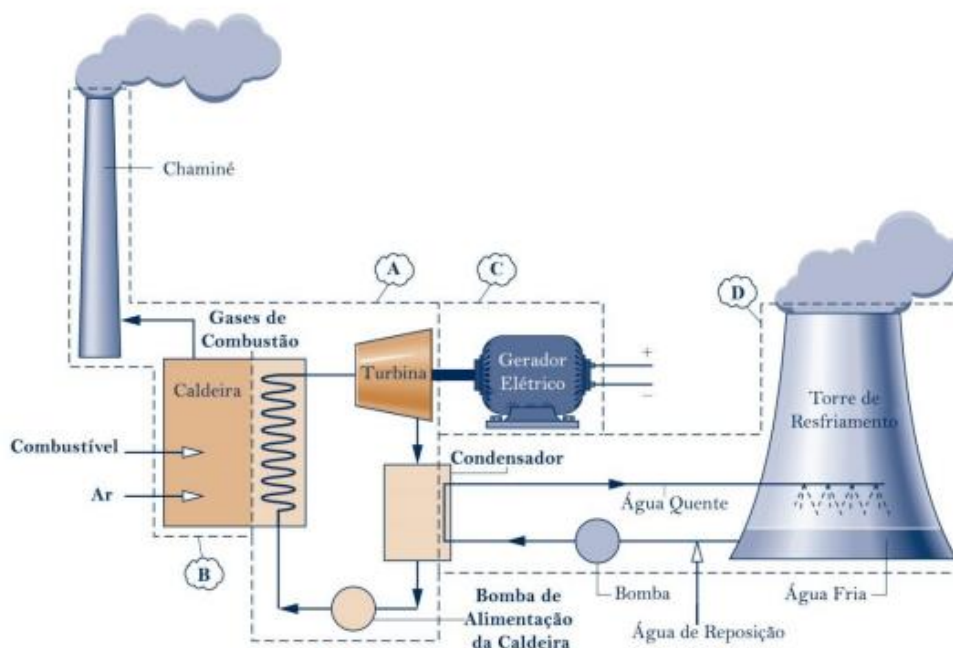
Uma Usina termoelétrica (UTE) a vapor agrupa diversos equipamentos interconectados e selecionados para uma ótima operação. Integrando os aspectos termodinâmicos dentro de um arranjo físico, para servir aos requerimentos de um projeto específico (BOHORQUEZ, 2007).

Centrais termoelétricas de geração com ciclo a vapor utilizam como máquina térmica uma turbina a vapor. Neste tipo de máquina térmica, a combustão é externa, por isso, pode-se utilizar biomassa, combustíveis fósseis e nuclear, energia solar e geotérmica.

Na Figura 3, são apresentados os principais componentes de uma usina termelétrica, podendo se dividir em seis subsistemas (LORA; NASCIMENTO, 2004):

- (A) - Equipamentos de ciclo a vapor: caldeira, turbina a vapor, condensador e bomba d'água de alimentação.
- (B) - Equipamentos de manuseio do combustível e exaustão dos gases à atmosfera.
- (C) - Equipamento para a conversão de energia mecânica em energia elétrica.
- (D) - Equipamento do sistema de resfriamento aos sistemas auxiliares.

Figura 3 - Principais componentes de uma Termoelétrica



Fonte: Moran & Shapiro (2008)

Na caldeira, são injetados ar a pressão atmosférica, combustível e água, que entram através de serpentinas. Nessa etapa, a energia térmica gerada pelos produtos de combustão é transferida para o fluido de trabalho, produzindo vapor superaquecido já à alta pressão que, posteriormente, passa por uma turbina a vapor (BOHORQUEZ, 2007).

A turbina a vapor é um motor térmico rotativo de combustão externa, que possibilita geração de grande potência. Na combustão externa, a mistura ar/combustível não entra em contato com o fluido de trabalho que escoar no interior da máquina e realiza o processo de transformação de energia do combustível em potência de um eixo. O vapor aciona a turbina produzindo energia mecânica de rotação, que por sua vez aciona um gerador elétrico acoplado ao eixo da turbina obtendo-se assim a energia elétrica (EPE, 2016).

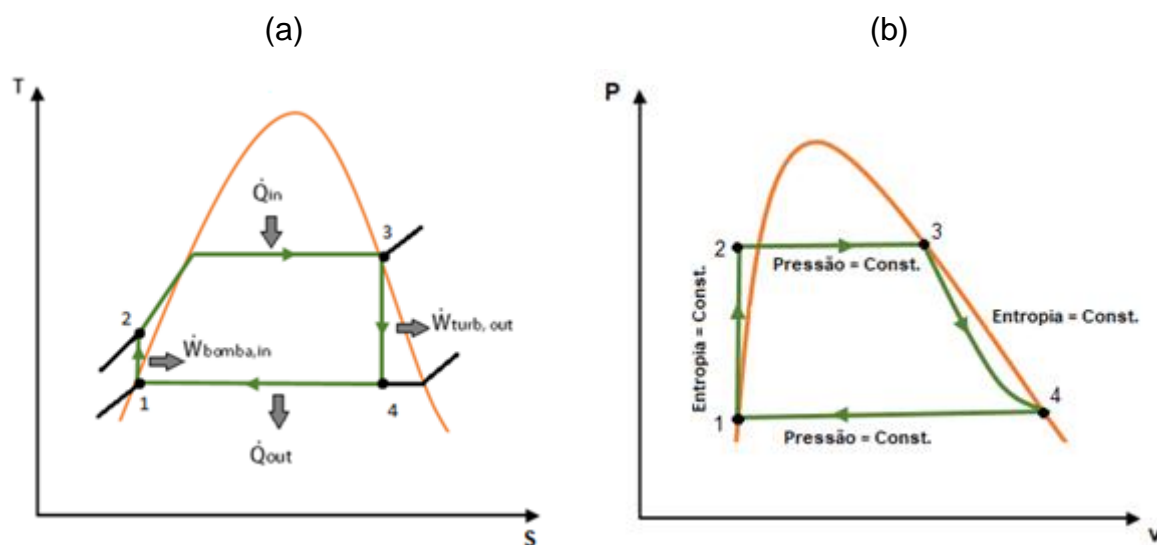
Após passar pela turbina, com uma menor pressão, o vapor entra no condensador, onde perde calor e, transformando-se em líquido saturado. Já como líquido a água é recirculada no processo por uma bomba, que transporta o fluido para o gerador de vapor fechando o ciclo. Esse processo termodinâmico simples é denominado de ciclo Rankine simples.

3.1.1 Ciclo Rankine Ideal

William John Macquorn Rankine desenvolveu a teoria completa do ciclo da máquina a vapor no seu famoso livro “*Manual of the Steam Engine and Other prime Movers*” de 1859. Rankine trabalhou sobre um novo ciclo termodinâmico, mais tarde designado por ciclo Rankine, que foi utilizado como padrão para o desempenho de instalações a vapor nas quais utiliza-se um vapor, com capacidade de se condensar, ou seja, um fluido ao qual as expansões e contrações realizem trabalho.

No manual, Rankine descreve o diagrama P-V, o ciclo e o comportamento de cada etapa da máquina a vapor, que conhecemos no século XXI. O ciclo Rankine Ideal pode ser resumido em quatro etapas que são representadas pelos diagramas na Figura 4.

Figura 4 - Diagramas termodinâmicos para o Ciclo Rankine Ideal: (a) T-S; (b) P-V



Fonte: Moran & Shapiro (2008)

Na Figura 4 (a), cada linha conectando dois números representa um processo, descrito por:

- 1-2: Compressão isentrópica (líquido comprimido) - Bomba de alimentação.
- 2-3: Pressão constante e fornecimento de calor (vapor saturado) – Caldeira.

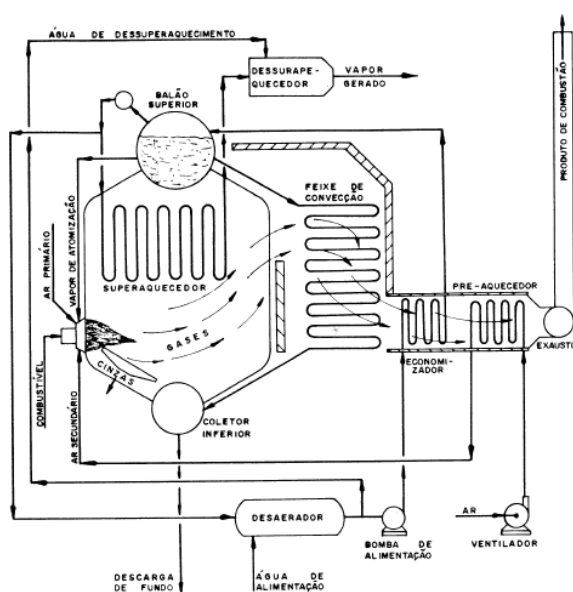
- 3-4: Expansão Isentrópica na turbina (mistura líquido mais vapor) – Turbina.
- 4-1: Pressão constante e condensação total do fluido de trabalho - Condensador.

Para análise do Ciclo Rankine Ideal, assume-se que a expansão do vapor na turbina ocorre de forma isentrópica, ou seja, existem perdas mecânica por atrito que não são somadas a quantidade de energia dissipada pelo trabalho da turbina. De forma semelhante, tal suposição também é assumida para a bomba.

3.1.2 Caldeira

A caldeira é o equipamento responsável pela transformação física da água em vapor conforme Figura 5. Com a queima de combustível na fornalha gera-se calor que é transferido para a água até a mesma se transformar em vapor, segundo a Norma Regulamentadora N°13 - NR-13 (MTE, 1978), “caldeira a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica”.

Figura 5 - Esquema de funcionamento de uma caldeira Aquatubular e seus principais fluxos de massa e energia



Fonte: Bizzo (2003)

3.1.3 Turbina a vapor

Turbina a vapor é uma máquina térmica rotativa, onde a energia térmica do vapor é convertida em energia cinética como consequência da expansão, dessa forma a energia é convertida em energia mecânica. Como resultado, em uma turbina convencional, as pás giram e a turbina produz trabalho.

De acordo com Mazurenko e Teixeira (2004) para as turbinas a vapor a transformação de energia em trabalho ocorre em duas etapas. Primeiramente, a energia do vapor é transformada em energia cinética, para que isso ocorra o vapor deve escoar através de pequenos orifícios, chamados expansores, onde, devido à pequena área de passagem o fluido adquire velocidade, aumentando a energia cinética, porém esse processo diminui sua entalpia. Para que o aumento da velocidade ocorra, como consequência ocorre a queda de pressão, temperatura e aumento no volume específico do vapor.

A segunda etapa ocorre quando a energia cinética é transformada em trabalho mecânico. Essa transformação pode ocorrer de duas maneiras distintas, uma pelo princípio da ação e outra pelo princípio da reação.

3.1.3.1 Critérios para classificação de turbinas

- Quanto ao acionamento: utilizado para acionar geradores elétricos, transformando a energia cinética em mecânica que ao incidir sobre as pás gera movimento para gerar energia elétrica.
- Acionamento mecânico – utilizado geralmente em indústrias para mover grandes maquinários e para propulsão de algumas embarcações.
- Quanto ao contato com o fluido de trabalho: Para turbinas de ação seu funcionamento é diretamente relacionado a queda de pressão do vapor na saída dos bocais, pode-se relacionar também a redução de entalpia devido a transformação em energia cinética. Dessa forma, o vapor a alta velocidade devido à redução de área na saída do bocal irá incidir sobre as pás, transformando a energia cinética em mecânica.
- Turbinas de reação: As turbinas de reação são constituídas de estágios em série, dessa forma para cada estágio existe um anel expensor ou roda de

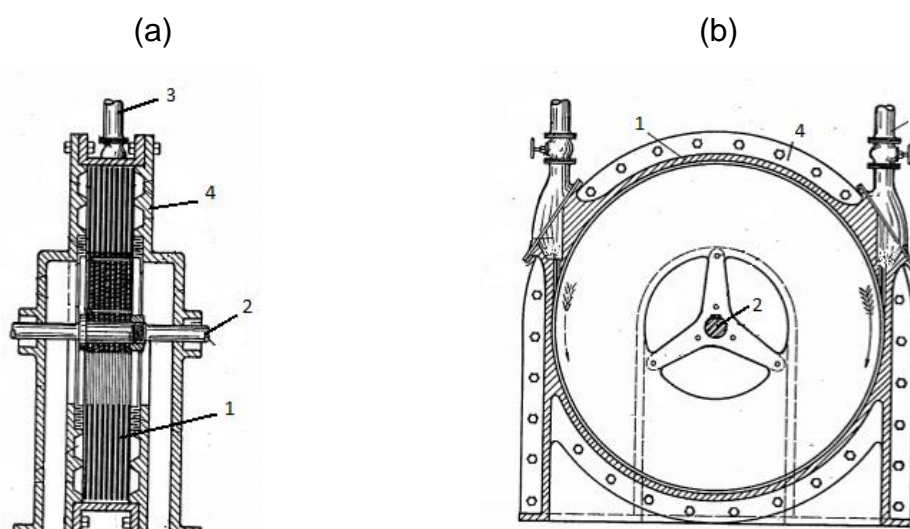
palheta fixa, seguido de uma roda de pás móveis. Nas turbinas de reação, parte da expansão ocorre nas palhetas fixas e parte nas palhetas móveis. Esse princípio de funcionamento é chamado de turbina de reação comercial, visto que, se toda reação de expansão fosse aplicada nas palhetas móveis, acarretaria em velocidades excessivas nas pás, que não seriam condizentes com sua capacidade e resistência mecânica.

3.1.3.2 Turbina tesla

Nas turbinas convencionais, o fluido incide contra pás fixadas à um rotor. A transferência de energia acontece principalmente devido ao contato direto do fluido com a pá no momento da colisão (MAZURENKO; TEIXEIRA, 2004).

Diferente das turbinas convencionais, a turbina Tesla não apresenta pás conectadas à um rotor. Sua construção interna é baseada em discos posicionados paralelamente uns aos outros presos à um eixo, assim como indicado na Figura 6. Devido ao efeito da camada limite gerada entre os discos, os mesmos são colocados em movimento. Esse conceito de turbina foi desenvolvido por Tesla a fim de construir um dispositivo capaz de utilizar os vapores de fontes geotérmicas para gerar eletricidade (PEREIRA, 2007).

Figura 6 - Turbina Tesla



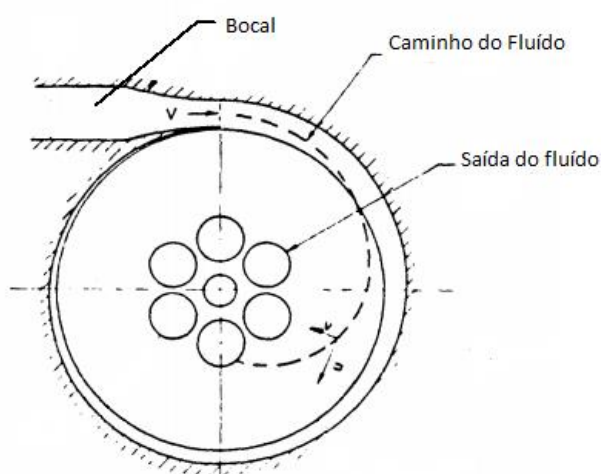
Fonte: Tesla (1913)

A turbina Tesla mostrada na Figura 6, utiliza em sua construção discos lisos (1) bem próximos uns aos outros, separados por espaçadores garantindo um paralelismo. Os discos são presos por um eixo (2) formando o rotor. A carcaça (4) é composta por mancais e um corpo que mantém o rotor enclausurado. Por fim o bocal (3) que tem como objetivo direcionar e aumentar a velocidade do fluido de entrada.

A operação da turbina Tesla só é possível devido ao conceito de camada limite desenvolvido por Ludwig Prandtl, que realizou diversas pesquisas na área de mecânica dos fluidos. Prandtl verificou que a camada limite estabelece uma condição de aderência do fluido à superfície, ou seja, o fluido imediatamente em contato com o corpo vai desacelerar até que atinja a velocidade do corpo.

Na Figura 7, está indicado o caminho que o fluido percorre ao entrar na turbina. Nota-se que o fluido de trabalho é injetado pelo bocal (ou em uma serie de bocais), escoando tangencialmente aos discos. No centro destes, existem pequenos furos, denominados região de descarga, por onde o fluido sai da turbina. Devido à pequena distância entre os discos, o fluido adere aos mesmo enquanto escoam.

Figura 7 - Esquema de operação de uma turbina Tesla



Fonte: Beans (1961)

O torque fornecido pela turbina depende da quantidade de discos e da tensão de cisalhamento entre os discos e o fluido. Segundo Beans (1961), quanto maior a tensão de cisalhamento, maior o torque gerado na turbina. O aumento do toque pode

ser relacionado ao aumento da quantidade de discos, gerando um acréscimo na tensão entre o fluido e as pás.

3.1.4 Condensador

O condensador é um trocador de calor utilizado em uma UTE's, a fim de transformar o vapor que saí do último estágio da turbina em líquido saturado. Esse fenômeno ocorre devido à troca de calor do fluido de trabalho com o fluido de resfriamento que geralmente é água proveniente de fontes externas, como rios, lagos, oceanos, entre outras.

Existem dois tipos convencionais de condensadores que podem ser utilizados em termoelétricas: são os de contato direto e de superfície. Os trocadores de contato direto condensam o vapor pela mistura com o fluido de resfriamento na mesma câmara. Os trocadores de calor de superfície trabalham com contato indireto, ou seja, o vapor ao entrar no condensador, troca calor por condução, o fluido que está dentro dos tubos está com a temperatura menor, dessa forma, em contato com o vapor ocorre a transferência térmica diminuindo a temperatura do vapor até a temperatura de condensação, transformando o vapor em líquido saturado (VOSOUGH et al., 2011).

3.1.5 Bomba

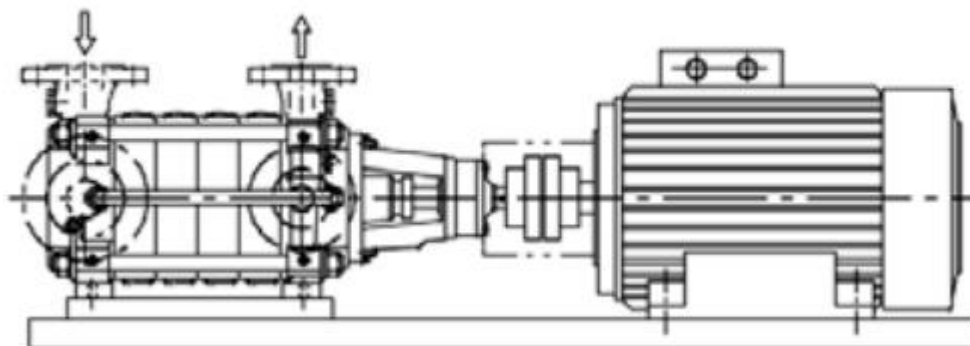
A bomba é responsável por aumentar a pressão de água líquida sendo, neste caso, a água de alimentação da caldeira. O sistema de geração de vapor não pode ficar sem água, sendo a bomba a responsável por manter a água constantemente na caldeira, e sendo um dos principais equipamentos, fundamental para a segurança.

A caldeira trabalha a pressão constante, cujo valor determina a pressão do sistema. Ao se dimensionar uma caldeira, leva-se em consideração diversos fatores, como a perda de pressão, e a localização da mesma, tal que a bomba deve ser de fácil acesso para se facilitar a sua manutenção, além de, o sistema de caldeira normalmente tem mais de duas bombas, como uma medida de segurança.

As bombas são geralmente centrifugas de múltiplos estágios conforme Figura 8, utilizadas pela sua alta pressão. As bombas centrifugas são acionadas por motores

elétricos ou turbinas que são movidas pela própria disponibilidade de vapor da caldeira.

Figura 8 - Bomba múltiplo estágio



Fonte: KSB (2012)

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentada a metodologia utilizada para o projeto e construção da turbina Tesla. A referência principal adotada para o projeto da turbina neste trabalho é a tese desenvolvida por Batista (2009).

4.1 PROJETO TURBINA TESLA

Nesta seção é apresentado os calculos fundamentais para construção da turbina Tesla real, utilizando conceitos relacionado a Termodinâmica e Mecânica dos Fluidos.

4.1.1 Cálculo do Bocal

Para que a velocidade do fluido seja máxima na saída do bocal, é necessário o cálculo da área B , a fim de obter as dimensões para construção.

A pressão de vapor P_0 utilizada no experimento é de 150 kPa com temperatura de $T_0 = 111,37 \text{ °C}$ e $\rho_0 = 1,12 \text{ kg/m}^3$. A vazão mássica de vapor \dot{m} , no sistema de geração de vapor é de $2,35 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$.

Para efeito de cálculo do projeto do bocal, considerou-se o sistema isentrópico e que a velocidade de entrada é desprezível, logo temos as relações:

$$P = \frac{P_0}{\left\{1 + \left[\frac{(k-1)}{2} M^2\right]\right\}^{\frac{k}{k-1}}} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{\rho_0}{\left\{1 + \left[\frac{(k-1)}{2} M^2\right]\right\}^{\frac{1}{k-1}}} \quad (4)$$

$$T = \frac{T_0}{1 + \left[\frac{(k-1)}{2} M^2\right]} \quad (5)$$

Onde, $k = c_p/c_v = 1,346$ é a constante do vapor Anexo A1, P_0 é a pressão na entrada do bocal, P é a pressão de estagnação e $M = 1$ é o número de Mach nas condições de escoamento sônico.

Após calcular as propriedades de estagnação na saída do bocal, calcula-se a velocidade do som do fluido na saída do bocal, obtém-se um valor aproximado utilizando a equação para gás perfeito.

$$V = \sqrt{kRT} \quad (6)$$

Onde, $R = 418,9 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ é a constante dos gases obtido no Anexo A1, $T = (47,3 + 273,15) \text{ K}$ é a temperatura do fluido em Kelvin e $k = 1,346$ é a constante de vapor de água obtido no Anexo A1.

A partir dos valores obtidos, pode-se calcular a área de saída do bocal considerando a vazão do volume de controle, logo:

$$\dot{m} = B\rho V \quad (7)$$

Dessa forma, reorganizando a equação (7), tem-se:

$$B = \frac{\dot{m}}{\rho V} \quad (8)$$

Onde, B é a área de saída do bocal, $\rho = 0,71 \text{ kg/m}^3$ é a densidade do fluido e $V = 421,9 \text{ m/s}$ é a velocidade máxima do fluido.

Dessa forma a área total da saída do bocal é de $7,84 \text{ mm}^2$. Para que a distribuição do fluido seja igual em todo rotor, deve-se fabricar um bocal de preferência em formato retangular.

4.1.2 Cálculo da Espessura da Camada Limite Laminar

O cálculo da espessura de camada limite laminar, é desenvolvido a partir da estimativa:

$$\delta_l \approx 5 \sqrt{\frac{v\pi D}{V}} \quad (9)$$

Onde, $D = 0,032 \text{ m}$ é o diâmetro do disco, $v = 1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ é a viscosidade cinemática do fluido.

Porém o desenvolvimento da camada ocorre entre as duas superfícies do disco, uma para cada superfície, dessa forma a distância máxima de separação (D_{max}) deverá ser de 2δ , logo:

$$D_{max} = 2\delta \quad (10)$$

Onde, D_{max} é a distância máxima entre os discos.

4.1.3 Cálculo da Espessura da Camada Limite Turbulenta

Para o cálculo da espessura da camada limite relaciona-se as dimensões do disco como raio interno $r = 8 \text{ mm}$ e raio externo $R = 16 \text{ mm}$.

A espessura da camada limite turbulenta para um disco girando é desenvolvida pela seguinte equação (SCHLICHTING; GERSTEN, 1979):

$$\delta_t = 0.526r \left(\frac{v}{r^2\omega} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (11)$$

Onde, r é o raio de saída do fluido de trabalho e ω é a velocidade angular.

Após cálculo da camada limite turbulenta pode-se obter a distância máxima entre os discos utilizando a Equação (10) $D_{max} = 7,57 \times 10^{-4} \text{ m}$.

A partir do cálculo da camada limite turbulenta e laminar, observou-se que a menor distância admitida ocorre para o escoamento laminar. Para se aproveitar ao máximo do efeito da viscosidade na camada limite, deve-se utilizar a distância de $4,88 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ ou $0,48 \text{ mm}$.

Para efeito de construção utilizou-se a distância de $0,3 \text{ mm}$ entre os discos. Optou-se por utilizar uma distância menor, para aproveitar ao máximo os efeitos da camada limite.

4.1.4 Cálculo da Potência da Camada Limite Turbulenta

A partir da teoria desenvolvida por Schlichting (1979) para regime turbulento, o torque exercido pelo sistema de discos, pode ser escrito como:

$$\tau = \frac{0,073}{2} \cdot \rho_m \omega^2 R^5 \left(\frac{v}{\omega R^2} \right)^{1/5} \quad (12)$$

Onde, $\rho_m = 0,073 \text{ kg/m}^3$ é a massa específica, obtida utilizando o Anexo A1, e ω é a velocidade angular do disco onde a velocidade é $V/2 = 210,95 \text{ m/s}$.

O torque total pode ser definido pela Equação (13):

$$\tau_t = 2(n - 1) \cdot T_0 \quad (13)$$

Dessa forma podemos calcular a Potência máxima na Equação (14):

$$P = T_T \omega \quad (14)$$

4.2 RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Nesta seção é apresentado o resumo dos dados obtidos nos cálculos do projeto da turbina Tesla, em conjunto com as respectivas letras.

Tabela 1 – Resultado das equações do projeto

Resultados das equações da seção 4.1		
Equações	Letra	Resultado
(3)	P	79,3 kPa
(4)	ρ	0,71 kg/m ³
(5)	T	47,3 °C
(6)	V	421,9 m/s
(8)	B	7,84 x 10 ⁻⁴ m
(9)	δ_l	2,44 x 10 ⁻⁴ m
(10)	D_{l-max}	4,88 x 10 ⁻⁴ m
(11)	δ_t	3,78 x 10 ⁻⁴ m
(10)	D_{t-max}	7,57 x 10 ⁻⁴ m
(12)	τ	3,81 x 10 ⁻⁵ Nm
(13)	τ_t	6,09 x 10 ⁻⁴ Nm
(14)	P	8,04 W

Fonte: Autoria própria

A partir dos cálculos de projeto a Tabela 2 apresenta um resumo das principais características para iniciar a construção do protótipo da turbina Tesla.

Tabela 2 – Principais Resultados do projeto

Dados do Projeto	
Área do bocal (B)	7,84 mm ²
Distância máxima entre discos (D _{max})	0,48 mm
Potência da turbina (P)	8,04 W

Fonte: Autoria própria

4.3 PRIMEIRA E SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

A primeira lei da termodinâmica para um volume de controle em regime permanente e escoamento uniforme pode ser escrito da seguinte forma:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_s \dot{m}_s * \left[h_s + \frac{V_s^2}{2} + g \cdot Z_s \right] - \sum_e \dot{m}_e * \left[h_e + \frac{V_e^2}{2} + g \cdot Z_e \right] \quad (15)$$

Onde, \dot{Q} é a taxa de transferência de calor, \dot{W} a potência, \dot{m} é a vazão mássica do sistema, h é a entalpia específica do fluido de trabalho, V é a velocidade do fluido quando cruza o volume de controle, g a aceleração da gravidade e Z é o nível em relação a um referencial.

Os subscrito e , s são referentes ao ponto de entrada e saída do fluido no volume de controle.

Uma forma mais usual de usar a equação (18) é desconsiderar as variações de energia cinética e potencial, logo:

$$Q - W = m * (h_s - h_e) \quad (16)$$

A equação (19) é utilizada para calcular algumas grandezas físicas nos ciclos a vapor, tais como a energia recebida pelo gerador de vapor e a energia da troca de calor do condensador e o valor de trabalho da bomba e da turbina.

O trabalho de uma máquina térmica pode ser escrito por uma relação da diferença entre o calor de uma fonte quente e o calor de uma fonte fria.

$$W = Q_H - Q_L \quad (17)$$

Onde, W é o trabalho útil gerado, Q_H é o calor fornecido para o ciclo a uma temperatura superior T_H e Q_L é o calor rejeitado pelo ciclo a uma temperatura T_L .

A referência para os cálculos da eficiência dos ciclos térmicos é dado por uma relação com o ciclo ideal, ou ciclo de Carnot que determina o limite máximo de rendimento para todos os ciclos. O rendimento térmico de um ciclo qualquer é dado pela relação:

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (18)$$

Onde, η é a eficiência térmica do ciclo.

4.3.1 Cálculo do Trabalho Realizado Por uma Turbina

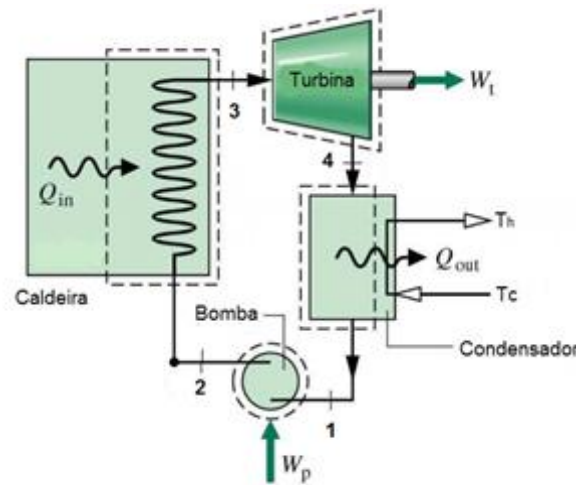
Os fluxos de trabalho são mostrados na Figura 9. O fluido de trabalho entra pela caldeira e se transforma em vapor no estágio 3, ganhando energia em forma de calor. O vapor se expande ao longo da turbina produzindo trabalho. Em seguida o vapor é descarregado no condensador no estágio 4 com pressão mais baixa.

Dessa forma, a equação que descreve o processo na turbina pode ser escrita da seguinte forma:

$$\dot{W}_t = h_3 - h_4 \quad (19)$$

Onde, \dot{W}_t é o trabalho que a turbina realiza, em kJ/kg.

Figura 9 - Unidade térmica geradora de vapor



Fonte: Moran Shapiro (2006)

4.3.2 Cálculo da Energia Térmica Gerada em uma Caldeira

O fluido de trabalho completa um ciclo quando o líquido deixa a bomba na etapa 2 e entra na caldeira ganhando energia até sua mudança de fase de água líquida para vapor saturado que sai na etapa 3. Utilizando dos balanços de massa e de energia, fornece:

$$\dot{Q}_{in} = h_3 - h_2 \quad (20)$$

Onde, \dot{Q}_{in} é a taxa de transferência de calor da fonte de energia que entra no sistema para o fluido de trabalho por unidade de massa, em $J \cdot s/kg$.

4.3.3 Cálculo da Eficiência Térmica

A eficiência térmica mede a quantidade de energia fornecida ao fluido de trabalho que passa pela caldeira e é convertida em trabalho líquido de saída. Dessa forma, a Equação (21) apresenta a eficiência térmica.

$$\eta = \frac{\dot{W}_{liq}}{\dot{Q}_{in}} \quad (21)$$

Uma das maneiras de elevar a eficiência do ciclo é aumentar a temperatura no ponto 3, essa energia adicional pode ser somada por transferência de calor para o vapor, transformando-o em vapor superaquecido na entrada da turbina. Ao aumentar o trabalho na turbina, a eficiência do ciclo aumenta. Uma outra alternativa é elevar a pressão de na caldeira. Esse aumento de pressão se dá com a modificação da velocidade da bomba, que por consequência acrescenta uma pressão maior na caldeira e um acréscimo no trabalho realizado pela turbina melhorando a eficiência do ciclo.

4.4 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Nesta seção, são apresentados os materiais e equipamentos utilizados para realização dos testes em bancada.

4.4.1 Caldeira

Caldeira é o aparato que transforma à água de sua forma líquida para vapor saturado ou superaquecido. Para simular uma caldeira utilizaremos uma panela de pressão de cozinha, conforme Fotografia 1, que apesar da sua baixa pressão e temperatura de trabalho comparado a caldeiras industriais, ela serve para o estudo didático.

Fotografia 1 - Panela de pressão



Fonte: Panex (2018)

Uma panela de pressão de cozinha, pode alcançar uma pressão de 1,8 bar antes de sua válvula de segurança abrir e uma temperatura de aproximadamente 120 °C. Para controle utilizou-se uma válvula de fluxo que foi colocada na saída de vapor.

4.4.2 Gerador

O gerador de energia é o componente que transforma a energia mecânica em energia elétrica, pelo movimento, no caso de rotação da turbina. Os geradores mais comuns são os de fluxo radial, que tem como característica um fluxo magnético que percorre uma direção perpendicular ao sentido de rotação do motor. Tais características disseminaram esse tipo de gerador pela facilidade construtiva, tornando-o um produto barato.

Um gerador pequeno de ímã permanente, conforme Fotografia 2, foi utilizado para geração de energia do sistema, sendo adaptado de um motor de uma unidade de CD-ROM. Os motores de corrente contínua de ímãs permanentes também servem como geradores de energia elétrica, conforme o eixo é movido o sistema gera um campo magnético, esse campo girante induz um conjunto de tensões trifásicas nos enrolamentos de estator do gerador e, conseqüentemente, gerando energia elétrica (CHAPMAN; STEPHEN, 2013).

Fotografia 2 - Motor da marca Fountain 5,6 V



Fonte: Fountain (2018)

4.4.3 Manômetro

O manômetro usado para medir a pressão do gerador de pressão é da marca Genebra, conforme Fotografia 3 que possui um erro relativo de medição de 1,6%, no intervalo de 0 bar a 10 bar, segundo o manual do fabricante.

Fotografia 3 - Manômetro



Fonte: Genebra (2018)

4.4.4 Válvula

A válvula de controle de fluxo, Fotografia 4, é usada para controlar não somente o fluxo, mas a pressão interna do gerador de pressão.

Fotografia 4 - Válvula de controle de fluxo



Fonte: Autoria própria

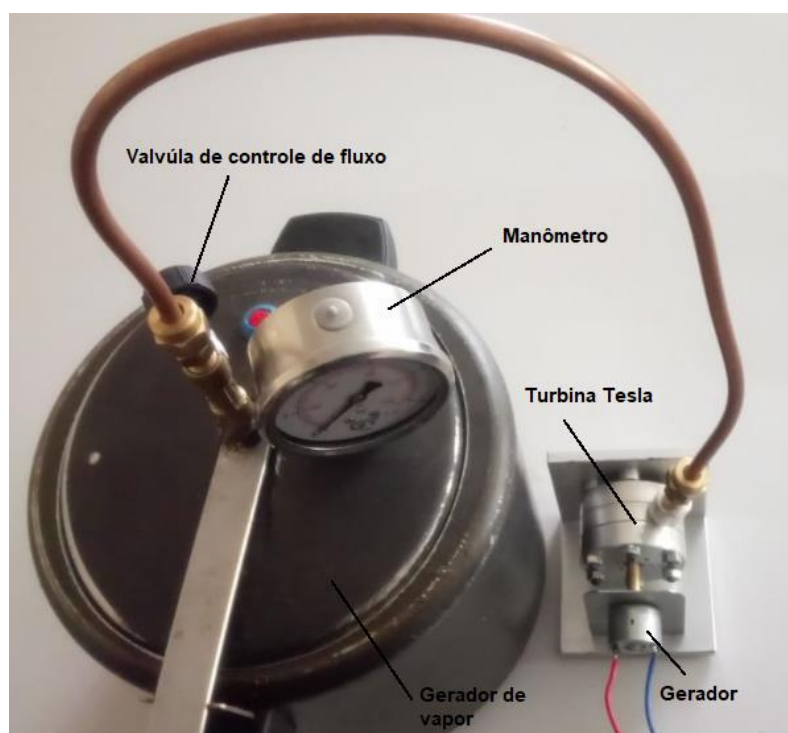
A válvula é fechada para aumentar a pressão que pode ser observada no manômetro, e aberta em seguida quando se alcança a pressão de trabalho. Como medida de segurança, o gerador de pressão possui uma válvula de segurança de fábrica que suporta uma pressão de até dois bar, conforme de manual de utilização do fabricante.

5 RESULTADO E DISCUSSÕES

5.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA CONSTRUÍDO

O Sistema construído é composto por um gerador de vapor, válvula controladora de pressão, manômetro, turbina Tesla e gerador elétrico, conforme Fotografia 5.

Fotografia 5 - Sistema para testes do projeto da turbina Tesla

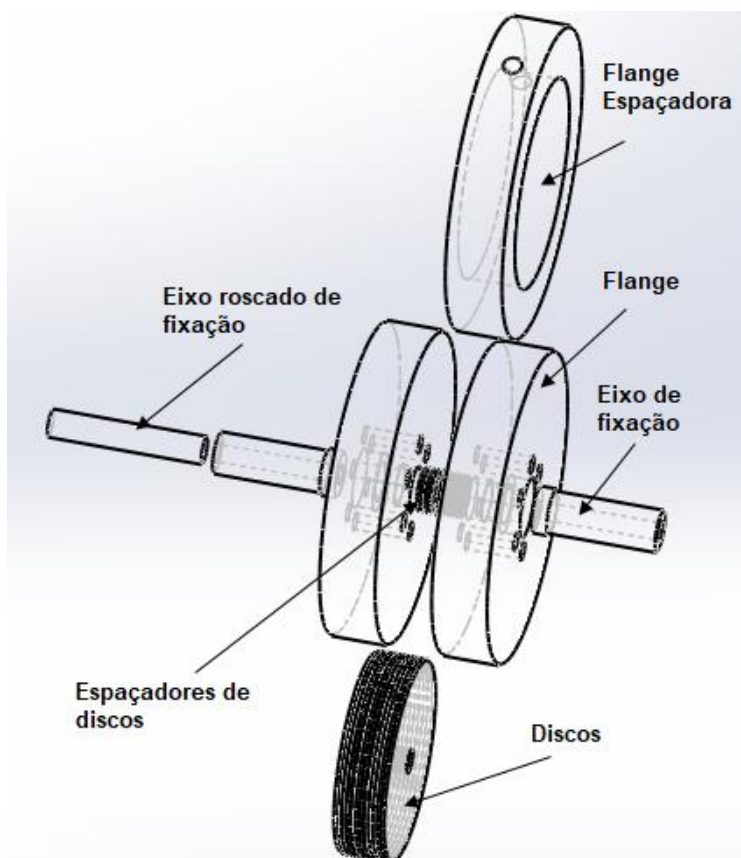


Fonte: A autoria própria

5.1.1 Turbina Tesla

Para o projeto da turbina Tesla, optou-se por utilizar matérias que fossem leves e de simples fabricação, utilizando metais não ferrosos para evitar corrosão, já que o objetivo é utilizar vapor de água. O detalhamento das peças da turbina é mostrado na Figura 10, e o desenho em 2D é mostrado na Figura 11.

Figura 10 - Montagem da turbina Tesla explodida



Fonte: Autoria própria

A turbina Tesla utilizada nos testes, foi construída em alumínio, eixo de bronze e discos de inox, conforme Fotografia 6. Para que as condições de perdas de calor no sistema fossem minimizadas, optou-se por deixar a turbina o mais próximo possível da saída de vapor, utilizando um tubo de cobre de 300 mm.

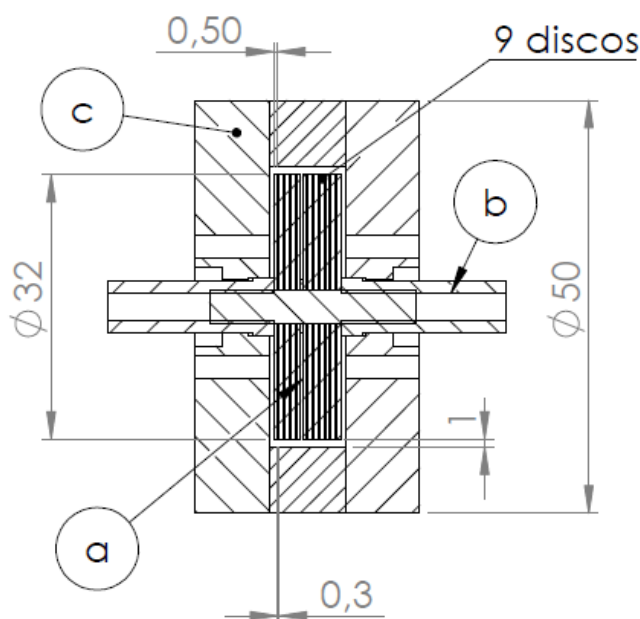
Fotografia 6 - Turbina Tesla e seus componentes



Fonte: Autoria própria

Para o processo de construção, utilizou-se de uma furadeira de bancada, torno convencional e fresadora convencional. A fabricação foi baseada nos dados do projeto e antes da sua construção a turbina Tesla foi desenhada no programa 3D e 2D, Solidworks versão 2016, para mensurar melhor as peças e os encaixes.

Figura 11 - Componentes da turbina Tesla. a) pás; b) eixo; c) corpo da turbina



Fonte: Autoria própria

Para montagem da turbina, utilizou um sistema de fixação não chavetado, os eixos são partidos e as pás são presas por um eixo roscado no centro, dessa forma sempre que a turbina está em movimento o sentido da rosca está apertando as pás e isso mantém o sistema sempre em aperto. Utilizou-se rolamentos esféricos vedados para que o sistema dinâmico fique o mais livre possível.

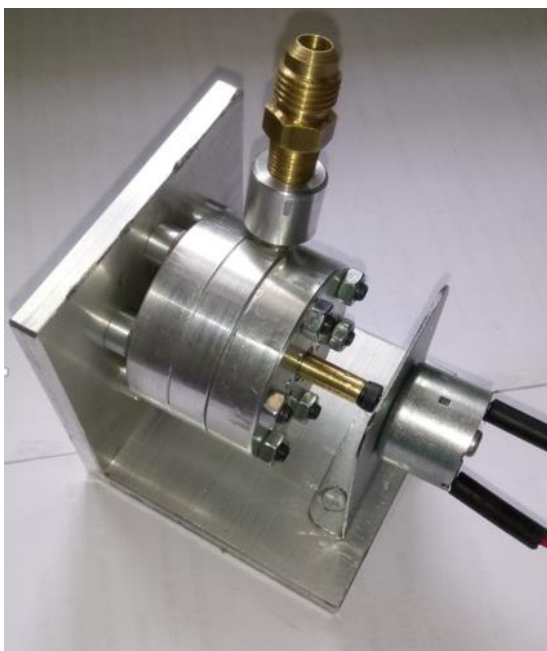
Foram feitas 6 saídas de vapor em cada flange, com diâmetro de 3 mm. O sistema de entrada (bocal) foi construído tangencialmente às pás para obter a máxima velocidade do sistema, para fixação entre o tubo e o bocal, fabricou-se um adaptador para fixação da conexão.

A turbina foi montada em uma cantoneira de alumínio para que o sistema (turbina e gerador) ficassem o mais próximo possível, sendo que o conjunto é fixado por 6 parafusos cabeça sextavado interno e 6 contra porcas.

Em testes dinâmicos realizados no laboratório de Usinagem, da Universidade Teológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Ponta Grossa, utilizando ar comprimido a 5 bar a turbina chegou a uma taxa de rotação de 20.000 rpm. As medições foram realizadas utilizando um tacômetro digital modelo DT 2234C. Os testes comprovaram que a velocidade de saída do bocal calculado está dentro dos parâmetros e que a turbina está apta a realizar os testes com vapor, já que a mesma suporta uma pressão superior do que a utilizado para geração de energia conforme projeto descrito anteriormente.

A Fotografia 7, apresenta a turbina Tesla montada com os parâmetros de projeto, para realização dos testes com vapor à 120 °C.

Fotografia 7 - Montagem turbina Tesla



Fonte: Autoria própria

5.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO

5.2.1 Perda de Carga

Para o cálculo da perda de carga na tubulação que liga o gerador de vapor a turbina, fez-se necessário o cálculo de uma nova velocidade referente ao diâmetro interno do tubo de cobre \varnothing 4 mm.

$$V = \frac{Q}{\rho A} = \frac{2,35 * 10^{-3}}{0,71 * \pi 0,002^2} = 263 \text{ m/s} \quad (22)$$

Onde, A é a área da seção interna do tubo de cobre, utilizando $r = 2$ mm.

Para um fluxo de fluido dentro de dutos, a perda de carga pode ser calculada através da Equação (27), segundo Bizzo (2003):

$$\Delta p = f_d x \frac{L}{d} \rho \frac{V^2}{2} \quad (23)$$

No caso do fluxo dentro de tubos lisos, o fator de atrito depende do número de Reynolds, Equação (28), e da rugosidade do tubo, cujo valores são obtidos a partir do Anexo C1.

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} = \frac{0,71 * 263 * 0,004}{0,0000122} = 61.222,9 \quad (24)$$

Dessa forma, pode-se calcular a perda de carga utilizando os dados obtidos do projeto, comprimento total do duto $L = 300$ mm, diâmetro característico do tubo $d = 4$ mm. Reynolds calculado pela Equação (28), $Re = 61222,9$. Com isso, pode-se obter o fator de atrito de Darcy $f_d = 0,02$. Por fim pode-se calcular a perda de carga utilizando a Equação (27).

$$\Delta p = 29,65 \text{ kPA ou } 0,29 \text{ bar} \quad (25)$$

Ou seja, o sistema de tubo terá 0,29 bar de perda de carga pelo tubo que liga o gerador de vapor à turbina.

5.2.2 Potência da Turbina Tesla

Para o cálculo da potência da turbina Tesla, fez-se de medições utilizando um multímetro digital ET-1002 da marca Minipa. Nos testes, foram medidas a corrente I , na escala de 10 Ampères, e a tensão U , na escala de 20 Volts. Foram realizados 3 medições e os valores médios de corrente e tensão são $0,506 \text{ A} \pm 0,031$ e $4,92 \text{ V} \pm 0,095$, respectivamente. Utilizando uma pressão de 1 bar e uma vazão já calculada de $2,35 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$, assim pode-se calcular a potência experimental da turbina Tesla pela Equação (30).

$$P_t = I \cdot R = 0,506 * 4,923 = 2,49W \quad (26)$$

Para análise de potência, não se pode chegar a pressão desejada de trabalho, pois a válvula de segurança se abre quando a pressão manométrica ultrapassa 1,2 bar.

O gerador de pressão não consegue manter a pressão constante, ou seja, logo ao abrir a válvula de fluxo a pressão cai consideravelmente dentro do sistema, mas pode-se obter valores razoáveis apesar do acúmulo de perdas do sistema. 42

Em conjunto com os testes, fez-se a medição da velocidade de rotação da turbina utilizando vapor a 1 bar. A turbina Tesla chegou a rotação máxima de 12.000 rpm, utilizando para medições o tacômetro digital descrito na seção 5.1.1.

5.2.3 Eficiência Térmica

Para medir a eficiência térmica, calculou-se primeiramente a energia fornecida pelo sistema ao gerador de vapor, neste cálculo levou-se em conta a transformação térmica do fluido no sistema utilizando os dados de calor específico à $T = 290 \text{ K}$ sendo $C_p = 4,184 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ e calor de vaporização à $T = 373,15 \text{ K}$, sendo $h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}$. Todos os dados obtidos a partir da Tabela B1 do Anexo B.

Dessa forma, pode-se calcular a potência do sistema de geração de vapor utilizando a massa $m = 1 \text{ kg}$ de água, sendo que, para transformação completa o tempo cronometrado foi $t = 540 \text{ s}$.

$$Q_{\acute{u}til} = Q_s + Q_l = m \cdot C_p(\Delta T) + m \cdot h_{fg} = 2633,56 \text{ KJ} \quad (27)$$

$$Q_{\acute{u}til} = \frac{Q_{in}}{t} = \frac{2633,56}{480} = 4,87 \text{ W} \quad (28)$$

Para transformação da água em vapor tem-se que o rendimento da troca de calor entre a energia gerada pela chama e o gerador de vapor é de 75%, segundo Eletrobrás (2005), dessa forma temos que a energia fornecida pode ser descrita pela Equação (33).

$$\eta = \frac{\text{Energia útil}}{\text{Energia Fornecida}} \quad (29)$$

Dessa forma calcula-se a potência real do sistema de geração de vapor na Equação (34):

$$Q_{Real} = \frac{Q_{\acute{u}til}}{\eta} = \frac{4,87}{0,75} = 6,49 \text{ W} \quad (30)$$

Para o cálculo da eficiência térmica, foi necessário converter a unidade de potência líquida para Watt, pois a potência calculada com o auxílio do multímetro está nessa unidade, por fim tem-se o cálculo da eficiência térmica, dado por:

$$\eta = \frac{W_{liq}}{Q_{\acute{u}til}} = \frac{2,49}{6,49} = 0,38 \text{ ou } 38 \% \quad (31)$$

Portanto conclui-se que 62% da energia foi dissipada em forma de perdas de calor e de carga, bem como perdas mecânicas.

5.2.4 Resumo dos Cálculos da Análise de desempenho

A Tabela 3 apresenta os principais cálculos apresentados na seção 5.2

Tabela 3 – Principais Resultados da análise de desempenho

Dados da análise	
Perda de carga	0,29 bar
Potência da turbina (P_t)	2,49 W
Potência real do gerador de vapor (Q_{real})	6,49 W
Eficiência térmica (η)	38%

Fonte: A autoria própria

6 CONCLUSÃO

Nesse trabalho, uma metodologia relativamente simples para cálculo de projeto de uma turbina Tesla foi apresentada. O projeto desenvolvido com base nos conceitos fundamentais de Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica, Máquinas Térmicas e Usinagem.

Para construção da turbina Tesla, fez-se uso do laboratório de Usinagem da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Ponta Grossa, utilizando diversas máquinas que auxiliaram a criação do protótipo, encontrando diversos desafios técnicos que puderam ser superados para finalização da construção.

Os resultados obtidos durante os testes mostram que o objetivo principal do trabalho foi atingido, permitindo a construção de um sistema que fosse capaz de gerar energia utilizando uma turbina Tesla e vapor de água como fluido de trabalho.

Em comparação com o projeto a turbina Tesla testada em bancada, os resultados foram inferiores ao esperado, em virtude da grande perda de energia no sistema e por conta do gerador de vapor não manter uma pressão constante. Impossibilitando deste modo, se chegar na pressão determinada no cálculo do projeto, pois a válvula de segurança se abre quando a pressão manométrica ultrapassa 1,2 bar.

Conclui-se que apesar dos desafios, o trabalho apresentado pode servir de base para um projeto de um turbina Tesla, que pode ser construída utilizando poucos recursos tecnológicos, mas que obteve resultados satisfatórios para geração de energia em baixa escala.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Quanto a eficiência térmica obtida para a turbina Tesla de 38%, este pode ser aumentado melhorando o suporte do gerador, deixando-o mais livre possível e utilizando um sistema de transmissão ou acoplamento, reduzindo assim as perdas mecânicas. Além da utilização de um isolante térmico no tubo de alimentação da turbina, a fim de diminuir as perdas térmicas por transferências de calor.

Quanto ao gerador de vapor, utilizar um dispositivo com pressão constante e que possua um medidor de temperatura na saída de vapor, para obter dados mais preciso sobre a potência do gerador.

Pode-se sugerir também o uso de pressões maiores, temperaturas e vazões, para aumentar o rendimento e a potência de geração de energia elétrica.

Em testes de bancada, pode-se observar que o fluxo vapor sai da turbina Tesla ainda na forma de vapor, podendo ser utilizado em um ciclo fechado e pressurizado. Com isso, pode-se ainda sugerir a utilização da turbina Tesla em um circuito fechado utilizando um ciclo termodinâmico simples como o Ciclo Rankine.

REFERÊNCIAS

BRAZILIAN ENERGY RESEARCH COMPANY (EPE). Brazilian Energy Balance 2016. p. 14–18, 2016.

BOHORQUEZ, W. O. I. **Análise termoenergética , econômica e ambiental da repotenciação e conversão de UTEs com ciclo Rankine para ciclo combina.** p. 104, 2007.

BATISTA, J. C. **Microgeração de energia elétrica (abaixo de 100 kw) utilizando turbina tesla modificada.** UNESP-Doutorado, 2009. 108 f. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2009.

BEANS, E. W. **Performance Characteristics of Friction disc Turbine.** 1961.

BIZZO, WALDIR A. **Geração, distribuição e utilização de vapor** 146 f. 2003.

CENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodyamics an engineering approach.** Energy, v. 1, p. 553, 2002.

CHAPMAN, C.; STEPHEN, J. **Fundamentos de máquinas elétricas.** 5 ed ed. [s.l: s.n.].

COUTO, H.; DUARTE, J.; AND BASTOS-NETTO, D. **The Tesla Turbine Revisited.** Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization October 10-12, 2006, Sochi, Russian Federation, p. 1–6, 2006.

DA ROCHA, G. V. B.; GUIMARÃES, L. N.; PLACCO, G. **Otimização De Materiais Para As Partes Que Compõe.** International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2013.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos,** 2011.

G. VAN WYLEN; SONNTAG, R. **Fundamentos da termodinâmica.** [s.l: s.n.].

INCROPERA, F. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 638 f. 2008.

KHAN, M. U. S. et al. **Modern improved and effective design of boundary layer turbine for robust control and efficient production of green energy**. Journal of Physics: Conference Series, v. 439, n. 1, 2013.

LORA E, NASCIMENTO M. **Geração Termoelétrica. Planejamento**. In: Projeto e Operação, vol. 2. Rio de Janeiro: Interciência; 2004.

MORAN, M. J. SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 681 F. 2006

MAZURENKO, A. S.; TEIXEIRA, F. N. Turbinas a Vapor. **Geração Termelétrica: planejamento, projeto e operação**, 2004.

MECÂNICA, E. D. E. E.; PEREIRA, R. A. Projeto de uma turbina Tesla. XIV CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA. 2007, Uberlândia. UFU-MG, 2007. P. 1-7

MTE. NR 13 - Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações. **Ministério do Trabalho e Emprego**, v. 2, n. 13, p. 22, 1978.

MOODY, L.F. **Friction Factors for Pipe Flow**. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 66, 671-681. 1944.

NOGUEIRA, L. A. H., ROCHA, C. A., NOGUEIRA, F. J. H. e MONTEIRO, M. A. G. **Eficiência Energética no Uso do Vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás / Procel, 2005. p. 15.

REY LADINO, A. F. **Numerical Simulation of the Flow Field in a Friction-Type Turbine (Tesla Turbine)**. n. June, p. 1–6, 2004.

SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. **Boundary-Layer Theory**. v. 7 ed., p. 649, 1979.

VOSOUGH, A et al. Improvement Power Plant Efficiency with Condenser Pressure. **International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering**, v. 2, n. 3, p. 38–43, 2011.

ANEXO A – PROPRIEDADES DO VAPOR SATURADO

Tabela A1 – Propriedades do vapor saturado

°C	kPa	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg °C	kJ/kg °C	kJ/kg °C	kg/ms		kJ/kg °C	cp/cv	m ² /s
T	P	v	h	s	cp	cv	μ	c	R	k	ν
90	70.12	2.362	2660	7.478	2.011	1.504	0.00001193	467	0.507	1.337	2.818E-05
91	72.82	2.279	2661	7.466	2.014	1.506	0.00001196	467.6	0.508	1.337	2.726E-05
92	75.61	2.201	2663	7.453	2.017	1.508	0.000012	468.1	0.509	1.338	2.641E-05
93	78.49	2.125	2665	7.44	2.02	1.51	0.00001203	468.6	0.51	1.338	2.556E-05
94	81.47	2.052	2666	7.428	2.024	1.512	0.00001206	469.2	0.512	1.339	2.475E-05
95	84.53	1.983	2668	7.415	2.027	1.514	0.0000121	469.7	0.513	1.339	2.399E-05
96	87.69	1.916	2669	7.403	2.03	1.516	0.00001213	470.2	0.514	1.339	2.324E-05
97	90.94	1.852	2671	7.391	2.033	1.518	0.00001217	470.8	0.515	1.339	2.254E-05
98	94.3	1.79	2673	7.379	2.037	1.52	0.0000122	471.3	0.517	1.34	2.184E-05
99	97.76	1.731	2674	7.366	2.04	1.522	0.00001223	471.8	0.518	1.34	2.117E-05
100	101.3	1.674	2676	7.354	2.044	1.525	0.00001227	472.3	0.519	1.34	2.054E-05
101	105	1.619	2677	7.343	2.047	1.527	0.0000123	472.9	0.52	1.341	1.991E-05
102	108.8	1.566	2679	7.331	2.051	1.529	0.00001234	473.4	0.522	1.341	1.932E-05
103	112.7	1.516	2680	7.319	2.055	1.531	0.00001237	473.9	0.524	1.342	1.875E-05
104	116.7	1.467	2682	7.307	2.058	1.534	0.00001241	474.4	0.524	1.342	1.821E-05
105	120.8	1.42	2684	7.296	2.062	1.536	0.00001244	474.9	0.526	1.342	1.766E-05
106	125	1.375	2685	7.284	2.066	1.538	0.00001247	475.4	0.528	1.343	1.715E-05
107	129.4	1.331	2687	7.273	2.07	1.541	0.00001251	475.9	0.529	1.343	1.665E-05
108	133.9	1.29	2688	7.261	2.074	1.543	0.00001254	476.4	0.531	1.344	1.618E-05
109	138.5	1.249	2690	7.25	2.078	1.545	0.00001258	476.9	0.533	1.345	1.571E-05
110	143.2	1.211	2691	7.239	2.082	1.548	0.00001261	477.4	0.534	1.345	1.527E-05
111	148.1	1.173	2693	7.227	2.086	1.55	0.00001265	477.9	0.536	1.346	1.484E-05
112	153.1	1.137	2694	7.216	2.09	1.553	0.00001268	478.4	0.537	1.346	1.442E-05
113	158.3	1.103	2696	7.205	2.094	1.555	0.00001271	478.9	0.539	1.347	1.402E-05
114	163.6	1.069	2697	7.194	2.098	1.558	0.00001275	479.3	0.54	1.347	1.363E-05
115	169	1.037	2699	7.183	2.103	1.561	0.00001278	479.8	0.542	1.347	1.325E-05
116	174.6	1.006	2700	7.172	2.107	1.563	0.00001282	480.3	0.544	1.348	1.29E-05
117	180.3	0.9759	2702	7.162	2.112	1.566	0.00001285	480.8	0.546	1.349	1.254E-05
118	186.2	0.947	2703	7.151	2.116	1.568	0.00001289	481.2	0.548	1.349	1.221E-05
119	192.3	0.9191	2705	7.14	2.121	1.571	0.00001292	481.7	0.55	1.35	1.187E-05
120	198.5	0.8922	2706	7.13	2.125	1.574	0.00001296	482.2	0.551	1.35	1.156E-05

Fonte: Programa *Equation Engineering System*

ANEXO B – PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA ÁGUA SATURADA

Tabela B1 – Propriedade termofísicas da água saturada

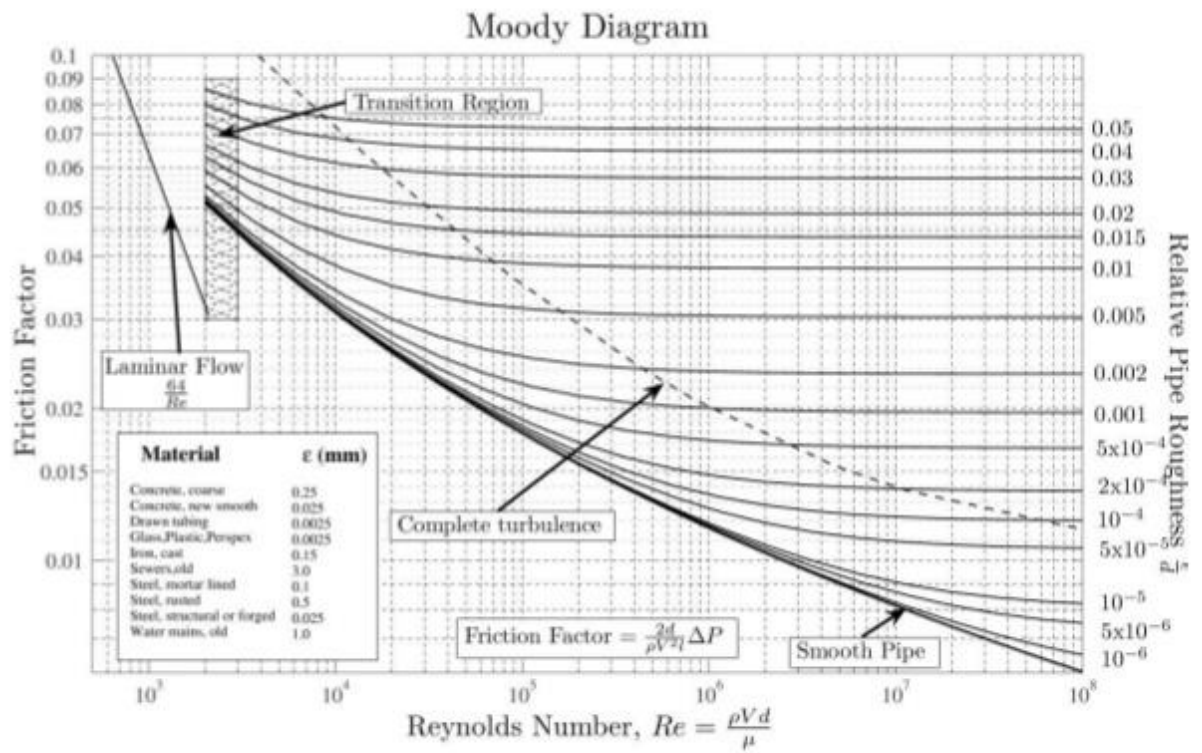
TABELA A.6 Propriedades termofísicas da água saturada^a

Temperatura, T (K)	Pressão, p (bars) ^b	Volume Específico (m ³ /kg)		Calor de Vaporização, h_{fg} (kJ/kg)	Calor Específico (kJ/(kg · K))		Viscosidade (N · s/m ²)		Condutividade Térmica (W/(m · K))		Número de Prandtl		Tensão Superficial, $\sigma_f \cdot 10^3$ (N/m)	Coeficiente de Expansão, $\beta_f \cdot 10^{-4}$ (K ⁻¹)
		$v_f \cdot 10^3$	v_g		$c_{p,f}$	$c_{p,g}$	$\mu_f \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_f \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	Pr_f	Pr_g		
273,15	0,00611	1,000	206,3	2502	4,217	1,854	1750	8,02	569	18,2	12,99	0,815	75,5	-68,
275	0,00697	1,000	181,7	2497	4,211	1,855	1652	8,09	574	18,3	12,22	0,817	75,3	-32,
280	0,00990	1,000	130,4	2485	4,198	1,858	1422	8,29	582	18,6	10,26	0,825	74,8	46,
285	0,01387	1,000	99,4	2473	4,189	1,861	1225	8,49	590	18,9	8,81	0,833	74,3	114,
290	0,01917	1,001	69,7	2461	4,184	1,864	1080	8,69	598	19,3	7,56	0,841	73,7	174,
295	0,02617	1,002	51,94	2449	4,181	1,868	959	8,89	606	19,5	6,62	0,849	72,7	227,
300	0,03531	1,003	39,13	2438	4,179	1,872	855	9,09	613	19,6	5,83	0,857	71,7	276,
305	0,04712	1,005	29,74	2426	4,178	1,877	769	9,29	620	20,1	5,20	0,865	70,9	320,
310	0,06221	1,007	22,93	2414	4,178	1,882	695	9,49	628	20,4	4,62	0,873	70,0	361,
315	0,08132	1,009	17,82	2402	4,179	1,888	631	9,69	634	20,7	4,16	0,883	69,2	400,
320	0,1053	1,011	13,98	2390	4,180	1,895	577	9,89	640	21,0	3,77	0,894	68,3	436,
325	0,1351	1,013	11,06	2378	4,182	1,903	528	10,09	645	21,3	3,42	0,901	67,5	471,
330	0,1719	1,016	8,82	2366	4,184	1,911	489	10,29	650	21,7	3,15	0,908	66,6	504,
335	0,2167	1,018	7,09	2354	4,186	1,920	453	10,49	656	22,0	2,88	0,916	65,8	535,
340	0,2713	1,021	5,74	2342	4,188	1,930	420	10,69	660	22,3	2,66	0,925	64,9	566,
345	0,3372	1,024	4,683	2329	4,191	1,941	389	10,89	664	22,6	2,45	0,933	64,1	595,
350	0,4163	1,027	3,846	2317	4,195	1,954	365	11,09	668	23,0	2,29	0,942	63,2	624,
355	0,5100	1,030	3,180	2304	4,199	1,968	343	11,29	671	23,3	2,14	0,951	62,3	652,
360	0,6209	1,034	2,645	2291	4,203	1,983	324	11,49	674	23,7	2,02	0,960	61,4	697,
365	0,7514	1,038	2,212	2278	4,209	1,999	306	11,69	677	24,1	1,91	0,969	60,5	707,
370	0,9040	1,041	1,861	2265	4,214	2,017	289	11,89	679	24,5	1,80	0,978	59,5	728,
373,15	1,0133	1,044	1,679	2257	4,217	2,029	279	12,02	680	24,8	1,76	0,984	58,9	750,
375	1,0815	1,045	1,574	2252	4,220	2,036	274	12,09	681	24,9	1,70	0,987	58,6	761,
380	1,2869	1,049	1,337	2239	4,226	2,057	260	12,29	683	25,4	1,61	0,999	57,6	788,
385	1,5233	1,053	1,142	2225	4,232	2,080	248	12,49	685	25,8	1,53	1,004	56,6	814,

Fonte: Incropera (2007)

ANEXO C – DIAGRAMA DE MOODY

Figura C1 – Diagrama de Moody



Fonte: Moody (1944)