

SISTEMA EM ESCALA REDUZIDA DE TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA EM TRABALHO MECÂNICO

Michel Rodrigo Pereira¹
Marcellus Fontenelle²

RESUMO

O homem cada vez mais está buscando por novas tecnologias que possibilitem técnicas inovadoras para a geração de energia ou geração de movimento através da transferência de calor. Baseando-se nesse pensamento e a preocupação com tecnologias mais limpas buscou-se criar um sistema em escala reduzida de transformação de energia térmica em trabalho mecânico com a finalidade de substituir equipamentos que eram demasiadamente poluentes e economicamente inviáveis. Uma máquina de fluxo tem como função converter um tipo de energia que está disponível na natureza em trabalho mecânico, sendo assim, para o sistema em questão necessitou-se avaliar a energia térmica disponível que é determinada através da pressão e calor que os vasos de pressão deverão suportar. O sistema baseou-se no ciclo termodinâmico de Rankine de geração de energia, dimensionado para trabalhar em circuito fechado, tendo assim, uma menor perda de energia. Para determinar a energia disponível no sistema o método de dinamômetro de prony foi o utilizado, sendo das opções a mais eficaz, pois o mesmo obtém o valor do torque que está atuando no eixo da turbina. Através das pesquisas realizadas para o desenvolvimento do sistema, pode-se afirmar que o projeto alcançou êxito no objetivo de desenvolver o sistema, podendo o mesmo ser aplicado em comércios, locais onde não tem energia elétrica disponível e vários outros.

Palavras-chave: Transferência de Calor. Vasos de Pressão. Máquinas de Fluido.

1 INTRODUÇÃO

No decorrer dos séculos e principalmente a partir da Revolução Industrial, o homem intensificou a busca por tecnologias mais avançadas que possibilitassem novas técnicas de geração de energia, objetivando a transmissão de força, tal como a geração de movimento. A primeira máquina de geração de vapor foi criada por Thomas Savery no ano de 1698. Tal máquina possibilitava transformar a energia armazenada em forma de vapor quente em energia que poderia ser utilizada para diversos fins nas indústrias, modificando profundamente os meios de transportes da época (MÁQUINAS A VAPOR, 2017).

De acordo com Telles (2007) *apud* Tomazini (2015), define-se vasos de pressão como sendo reservatórios para contenção de pressão tanto interna como externamente, pressão obtida através de uma fonte externa, ou através de calor aplicado direta ou indiretamente, ou a combinação de ambos os fatores.

¹ Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica da UCEFF – E-mail: michel_rodrigo210@yahoo.com.br

² Docente do Curso de Engenharia Mecânica da UCEFF – E-mail: marcellus.fontenelle@gmail.com

Os vasos de pressão são específicos para cada aplicação, sendo fundamentais em processos que contenham fluidos e são projetados para resistir com segurança a pressões internas diferentes da atmosférica. São amplamente utilizados nas indústrias de processo, refinarias de petróleo, petroquímicas, indústrias farmacêuticas e alimentícias, trabalhando em regime contínuo, 24 horas por dia, 12 meses no ano.

Neste contexto, esse estudo busca responder a seguinte questão: **um sistema de transformação de energia em dimensões simplificadas poderia ser projetado para ser aplicado nas indústrias para a geração de energia?** Para validação desse estudo fez-se necessário dimensionar e padronizar as dimensões para o sistema de vaso de pressão, efetuar o cálculo da energia em força de torque que o sistema poderá gerar a partir do vapor, avaliar as possíveis aplicações em que o sistema poderá ser utilizado, ponderando as vantagens e avaliando os custos de fabricação para possível produção em série.

Com a crescente preocupação na busca de tecnologias mais “limpas” e sustentáveis, busca-se desenvolver máquinas e equipamentos que possam gerar energia e substituir as tecnologias atualmente utilizadas de forma que sejam menos poluentes e atrativas na questão financeira.

Diante desse panorama, novas pesquisas de aperfeiçoamento de equipamentos há muito tempo utilizados se tornam uma possibilidade a serem pensadas, em função das inúmeras dificuldades de se descobrir novas tecnologias. É necessário avaliar a importância da percepção das vantagens do uso deste sistema, com o intuito de desenvolver um equipamento de alta qualidade, eficácia, durabilidade e segurança.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Quando houver um gradiente de temperatura no interior de um sistema, ou quando dois sistemas que estão em temperaturas em contato trocam energia, define-se como transmissão de calor (KREITH, 1997).

A transferência de calor nada mais é que, quando um corpo estiver a uma temperatura que for maior que a de outro corpo, ocorre a transmissão de energia de onde estiver a temperatura mais elevada para a mais baixa, ou seja, energia em trânsito. São três os tipos de

transferência de calor os quais podemos citar: condução, convecção e radiação (GRUGER, 2014).

2.1.1 Condução

A condução é quando se tem um gradiente de temperatura em um meio estacionário, podendo ser sólido ou fluido. O mecanismo físico da condução é quando ocorre transferência de energia das partículas mais energéticas para as partículas de menor energia de uma substância devido às interações que existem entre elas (MORAN *et al*, 2013).

Nos líquidos e nos gases, a transferência de calor por condução ocorre devido às colisões e difusões das moléculas nos movimentos aleatórios que as mesmas fazem. Nos sólidos, ocorre devido a uma combinação das vibrações das moléculas em rede (ÇENGEL e GHATAR, 2012).

Ademais, pode-se quantificar os processos de transferência de calor em equações de taxas de transferência de calor, tal equação utiliza-se para efetuar o cálculo da quantidade de energia que está sendo transferida por unidade de tempo conhecida como Lei de Fourier conforme a equação 1:

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

onde o fluxo térmico q''_x (W/m²) é dado como a taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área perpendicular à direção da transferência, sendo proporcional ao gradiente de temperatura $\frac{dT}{dx}$. A constante de proporcionalidade k é uma propriedade de transporte definida como a condutividade térmica [W/m.K] (MORAN *et al.*, 2013).

2.1.2 Convecção

A convecção é como a transferência de energia entre uma superfície sólida, líquida ou gás adjacente, se move envolvendo os efeitos combinados da condução e de movimento de um fluido, ou seja, quanto mais rápido for este movimento, maior será a transferência de calor por convecção (ÇENGEL, 2012).

Este tipo de transferência de calor abrange dois mecanismos, onde a transferência de energia ocorre devido ao movimento molecular aleatório (difusão) e através do movimento

global do fluido, movimento este está associado, que em qualquer instante um grande número de moléculas move-se coletivamente ou agregadamente (INCROPERA *et al*, 2011).

De acordo com Moran *et al* (2013), para o cálculo da taxa de transferência de calor, independentemente da natureza do processo, a equação apropriada é a da Lei do Resfriamento de Newton de acordo com a equação 2:

$$q'' = h (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Ainda segundo Moran *et al* (2013), podemos destacar que: q'' é o fluxo térmico por convecção (W/m^2) que é proporcional à diferença entre as temperaturas da superfície e do fluido, (T_s e T_∞) e h é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2.K$).

2.1.3 Radiação

A radiação é toda a energia que é emitida pela matéria no formato de ondas eletromagnéticas resultantes das mudanças na configuração eletrônica dos átomos ou moléculas. Contrariamente a condução, a convecção e a radiação não exigem a presença de um meio interveniente (ÇENGEL, 2012).

Consideram-se processos de transferência de calor por radiação aqueles que são emitidos pela superfície onde se origina a energia interna da matéria que está limitada pela superfície, e a taxa pela qual a energia é liberada por unidade de área (W/m^2) sendo denominado de poder emissivo E , existindo um limite superior para o poder emissivo, que é previsto pela Lei de Stefan-Boltzmann e determinada pela equação 3 (MORAN *et al*, 2013).

$$Eb = \sigma * T^4 \quad (3)$$

onde: T_s é a temperatura absoluta (K) da superfície e σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2.K^4$)

Segundo Moran *et al* (2013), o fluxo térmico emitido por uma superfície real é menor que o emitido por um corpo negro à mesma temperatura e dá-se através da equação 4:

$$E = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (4)$$

onde ε é uma propriedade radiante da superfície denominada emissividade.

2.2 MÁQUINAS DE FLUXO

A máquina de fluxo tem a função de converter um denominado tipo de energia encontrada no meio ambiente em trabalho mecânico, fornecendo desta forma, energia a um determinado fluido com o intuito de deslocá-lo de uma área de baixa pressão para outra de alta. Se uma determinada máquina realiza trabalho como uma motriz ela é classificada como turbina e se realiza trabalho como operadora chama-se de bomba (BRASIL, 2006).

Ainda de acordo com Brasil (2006), pode-se classificar as máquinas de fluxo como sendo de deslocamento positivo ou dinâmico, onde as de deslocamento positivo a transferência de energia dá-se através da variação de volume que ocorre na fronteira na qual o fluido está confinado. Já as máquinas dinâmicas são as que não possuem volume confinado e são também chamadas de turbomáquinas.

Na natureza são encontradas várias formas de fontes de energia e devido a isso temos disponíveis vários tipos de turbinas, as turbinas hidráulicas onde a sua energia potencial é a água que é transformada em trabalho mecânico, já nas turbinas de vento a energia cinética do vento transforma-se em trabalho mecânico. Na energia térmica e nuclear são utilizadas as turbinas a vapor e a gás (BRASIL, 2006).

2.2.1 Motor Hidráulico

De acordo com Reik *et al* (2005) *apud* Klein (2014), os motores hidráulicos fazem a conversão de energia hidráulica em energia mecânica. Igualmente às bombas hidráulicas, os motores possuem um número de princípios e tipos construtivos, sendo necessário fazer a escolha de um motor conveniente para cada aplicação que se tiver.

Ademais, a potência que será fornecida irá depender da vazão e da diferença de pressão do motor, pois a potência é proporcional à rotação, sendo assim, motores que necessitam ser rápidos são utilizados em aplicações que necessitam de alta potência e os motores mais lentos são utilizados para torques mais altos.

De acordo com Shigley (2005) *apud* Klein (2014) para se dimensionar um motor hidráulico faz-se necessário ter a informação do momento torçor, podendo ser calculado através da equação 5:

$$T = \frac{30 * P}{\pi * n} \quad (5)$$

onde, T é o momento torçor em N.m, P é a potência em W e n é a rotação máxima em rpm;

Ainda segundo Reik *et al* (2005) *apud* Klein (2014), para fazer o dimensionamento de um motor hidráulico devemos fazer o uso das equações 6 e 7:

$$T = \frac{V_g \cdot \Delta p \cdot \eta_{mh}}{20 \cdot \pi} \quad (6)$$

$$Q = \frac{V_g \cdot n}{1000 \cdot \eta_{vol}} \quad (7)$$

onde: T é o momento torçor em N.m; Δp é a diferença de pressão entre a entrada e a saída do motor em bar; V_g é o deslocamento volumétrico do motor em cm^3 ; η_{mh} é o rendimento mecânico hidráulico (0,9 – 0,95); n é a rotação do motor em l/min; Q é a vazão do motor em l/min; η_{vol} é o rendimento volumétrico (0,9 – 0,95).

2.2.2 Turbina Vapor

Uma turbina a vapor é uma máquina térmica que faz o uso de energia do vapor na forma de energia cinética, transformando-a em energia mecânica. A turbina é um motor rotativo que faz a conversão em energia mecânica à energia advinda de uma corrente de água ou do vapor d'água ou gás, têm como elemento básico uma roda ou rotor por assim dizer, que conta com paletas, hélices, lâminas ou cubos (FERRAZ, 2008).

No mesmo contexto Ferraz (2008), cita que conforme a 2ª Lei da Termodinâmica, somente parte da energia que está contida no vapor será convertida em trabalho, o restante dessa energia, que não poderá ser transformada em trabalho permanecerá no vapor descarregado pela máquina. Esta transformação da energia do vapor em trabalho é feita em duas etapas, nas quais, inicialmente transforma-se em energia cinética, sendo o vapor obrigado a escoar através de pequenos orifícios de formato especial e posteriormente a energia obtida no expansor transforma-se em trabalho mecânico de duas maneiras diferentes.

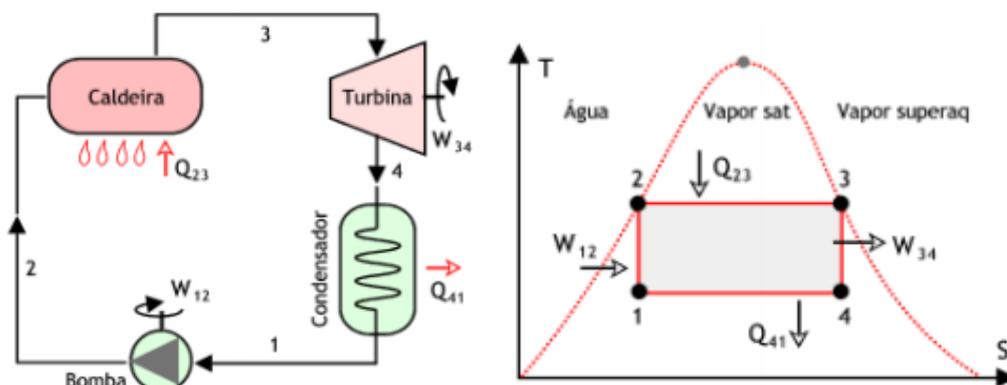
2.2.3 Ciclos de Potência a Vapor

Segundo Çengel; Boles (2013) o vapor de água pode ser considerado o fluido de trabalho mais utilizado em ciclos de trabalho em potência a vapor, porque ele possui inúmeras características que são benéficas para o funcionamento do ciclo, entre elas o baixo custo, possível e alta entalpia de vaporização.

2.2.4 Ciclo a Vapor de Rankine

Segundo Çengel; Boles (2013), o ciclo ideal para a obtenção de energia em ciclos de potência a vapor é o *Rankine*, pois elimina-se todos os problemas encontrados no ciclo Carnot. Ele é formado basicamente por quatro processos, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Ciclo de Rankine



Fonte: Fontenelle (2013).

Onde temos:

- 1-2 Compressão adiabática (trabalho fornecido à bomba).
- 2-3 Expansão isotérmica (calor da queima do combustível).
- 3-4 Expansão adiabática (trabalho fornecido pela turbina).
- 4-1 Compressão isotérmica (calor trocado no condensador).

Após a análise desses dois ciclos: de potência a vapor e ciclo de vapor de Rankine, o sistema utilizado será o *Rankine*, onde através de cálculos e dimensionamentos, poderá haver pequenas mudanças nos componentes que formam o sistema.

Para o ciclo de *Rankine* quatro elementos estão envolvidos: a bomba, a caldeira, a turbina e o condensador, sendo os mesmos dispositivos para escoamento permanente. Esse ciclo tem pouca variação de energia cinética e potencial de vapor em relação aos termos de trabalho e transferência de calor sendo os mesmos desprezados (ÇENGEL; BOLES, 2013).

Ainda segundo Çengel; Boles (2013) acaba-se reduzindo a equação da energia, sendo a mesma aplicada para um dispositivo com escoamento em regime permanente por unidade de massa conforme a equação 8:

$$(q_{ent} - q_{sai}) + (w_{ent} - w_{sai}) = h_{sai} - h_{ent} \left(\frac{kJ}{kg} \right) \quad (8)$$

Na caldeira e no condensador não temos nenhum trabalho, considerando assim que a turbina e a bomba sejam isentrópicas. Sendo assim, a equação de conservação da energia aplicada que deve ser utilizada segundo Çengel; Boles (2013) são 9, 10, 11, 12 e 13:

- Bomba ($q = 0$)

$$W_{bomba,ent} = h_2 - h_1 \quad (9)$$

$$W_{bomba,ent} = v(P_2 - P_1) \quad (10)$$

onde: $h_1 = h_{f \text{ a } P_1} \text{ e } v \cong v_1 = v_{f \text{ a } P_1}$

- Caldeira ($w = 0$)

$$Q_{ent} = h_3 - h_2 \quad (11)$$

- Turbina ($q = 0$)

$$W_{turb,sai} = h_3 - h_4 \quad (12)$$

- Condensador ($w = 0$)

$$Q_{sai} = h_4 - h_1 \quad (13)$$

Sendo determinada a eficiência térmica do ciclo de *Rankine* segundo Çengel; Boles (2013) através da equação 14:

$$\eta_t = \frac{w_{liq}}{q_{ent}} = 1 - \frac{q_{sai}}{q_{ent}} \quad (14)$$

Onde:

$$w_{liq} = q_{ent} - q_{sai} = w_{turb,sai} - w_{bomba,ent} \quad (15)$$

2.3 VASOS DE PRESSÃO

Os vasos de pressão são equipamentos utilizados nas indústrias de processo, nas refinarias de petróleo, petroquímicas e indústrias alimentícias e farmacêuticas. Esses equipamentos são fabricados de forma que sejam evitadas falhas como: a deformação elástica excessiva, incluindo instabilidade elástica, deformação plástica excessiva, incluindo instabilidade plástica, altas tensões localizadas, fluência a alta temperatura, fratura frágil a baixa temperatura, fadiga e corrosão (FALCÃO, 2002).

Complementando, Telles (2001) menciona que os vasos de pressão são recipientes estanques, de qualquer tipo, dimensões, formato ou finalidade, que são capazes de armazenar um fluido pressurizado, incluindo assim uma grande variedade de equipamentos.

Os vasos de pressão devem estar adequados a NR – 13, onde essa norma regulamentadora caracteriza o vaso de pressão como sendo um equipamento que contém fluido sobre pressão interna ou externa, que seja diferente da atmosférica.

2.3.1 Vasos de Pressão de Parede Fina

Os vasos de pressão de paredes finas possuem tensões normais que são distribuídas uniformemente, podemos citar como exemplos os de cascas cilíndricas, esféricas, cônicas ou toroidais que são submetidos à pressão tanto interna quanto externa de um determinado gás ou líquido. Os modelos mais encontrados são os de armazenamento de gás e líquido, tubos de água, caldeiras, cascos de submarinos e determinados componentes de avião (NASH e POTTER, 2014). Quando falamos de vasos de pressão com paredes finas, devemos fazer a relação de que a espessura da parede para o raio do recipiente não seja superior a 0,10.

2.3.2 Vasos de Pressão Cilíndricos

Nash e Potter (2014) exemplificam que os vasos de pressão cilíndricos de paredes finas normalmente são fechados em suas extremidades através de placas e são submetidos à pressão interna, onde podemos destacar as seguintes informações: pressão interna é p , a espessura da parede é h e o raio interno é r .

De acordo com Nash e Potter (2014) para que se possa efetuar o cálculo do aumento no raio do cilindro devido à pressão interna p , deve-se considerar isoladamente, os carregamentos axiais e circunferenciais. Com a pressão radial p , a tensão circunferencial é dada pela equação 16:

$$\sigma_h = \frac{pr}{h} \quad (16)$$

O comprimento em que ϵ_h atua é a circunferência do cilindro, que é $2\pi r$, sendo assim, a elongação total da circunferência é determinado pela equação 17:

$$\Delta = \epsilon h (2\pi r) = \frac{2\pi pr^2}{Eh} \quad (17)$$

Com a pressão axial p , tensões axiais são criadas, as quais são determinadas pela equação 18. As tensões axiais acabam dando origem às deformações axiais, onde podem ser calculadas pela equação 19, sendo assim um alongamento que está na direção da carga, no

caso na direção axial, vem acompanhado por uma diminuição na dimensão perpendicular à direção da carga (NASH, 2014).

$$\sigma_a = \frac{pr}{2h} \quad (18)$$

$$\epsilon_a = \frac{pr}{2Eh} \quad (19)$$

2.3.3 Instalação de Vasos de Pressão

A NR 13 no subitem 13.7. da Portaria nº 23/94 do Governo Brasileiro, menciona que todos os vasos de pressão precisam ser instalados de maneira que todos os drenos, respiros, bocas de visita e indicadores de nível, pressão e temperatura, se existirem, devem ser de fácil acesso (BRASIL, 2006 *apud* ALMEIDA, 2014).

Para ambientes confinados os requisitos básicos que devem ser observados e aplicados, são que o vaso de pressão seja instalado em um ambiente que possua duas saídas distintas com o objetivo de caso ocorrer vazamentos ou incêndios possa ter acesso ao mesmo.

2.4 POTÊNCIA MECÂNICA

Potência mecânica define-se como o trabalho que é efetuado por uma pessoa ou máquina em um determinado espaço de tempo, sendo assim, a mesma transmite-se através do acionamento de um mecanismo ou através da força física (TURRA, 2014).

Ainda segundo Turra (2014), a potência mecânica do sistema será obtida aplicando a equação 20:

$$\tau = F * x \quad (20)$$

onde: a força “F” é determinada pela força na extremidade do braço e a variável “x” a partir da distância do centro do eixo da turbina até a extremidade do braço de reação.

2.4.1 DINAMÔMETRO DE PRONY

O dinamômetro de prony é o dispositivo mais antigo existente e que até hoje é utilizado, o mesmo utiliza-se para fazer a medição da potência de motores, tem a construção no formato de um volante circundado por uma cinta que é conectada a um braço, onde a extremidade apoia-se sobre uma plataforma de uma balança. Pelo rotor faz-se o acionamento

do motor, e o seu movimento acaba sendo restringido pela pressão, que é aplicada na cinta, fazendo a transmissão do esforço ao braço que está apoiado no dinamômetro. Efetuado a leitura do dinamômetro, faz-se o cálculo do esforço despedido pelo motor (PEREIRA, 1999 *apud* TURRA, 2014). A potência do motor mede-se quando da conversão do trabalho do mesmo em calor, através do atrito do tambor em movimento rotativo, o valor que é produzido é retirado através de um sistema refrigerador, que consiste num caudal de água que envolve o tambor em seu interior (TURRA, 2014).

Ainda segundo Turra (2014), a potência mecânica pode ser calculada através das equações 21 e 22:

$$Pot = \omega * \tau \quad (21)$$

onde: “ ω ” é a velocidade angular “velocidade de rotação do eixo da turbina”, e τ é o torque obtido.

$$Pot = \left[2 * \pi * \left(\frac{n}{60} \right) * L \right] * P \quad (22)$$

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Para o andamento do projeto, fez-se necessário a fabricação em escala dos equipamentos que compõem o sistema de geração de energia. Estes equipamentos foram fabricados com diferentes tipos de materiais após uma avaliação que observou se os parâmetros para o funcionamento do sistema estavam baseados nas normas.

Foram realizadas as seguintes etapas, a fim de atingir o objetivo proposto: a proposição de um sistema conforme objetivos planejados. Primeiramente foi realizada a avaliação da energia térmica disponível no sistema proposto, dimensionamento dos equipamentos do conjunto, detalhamento destes equipamentos, determinação através de cálculos da energia mecânica gerada, avaliação de possíveis aplicações do sistema, determinação se este equipamento se enquadra na normativa NR 13.

Através da pesquisa de campo realizada nas dependências de uma empresa da área metal mecânica com sede na cidade de Chapecó – SC foi possível à fabricação da maioria dos componentes que fazem parte do sistema, desta forma sendo possível a coleta de dados para determinar o dimensionamento do sistema.

Através de uma análise quantitativa a energia mecânica e térmica disponíveis foram determinadas. A térmica pela quantidade de pressão e calor que os vasos de pressão deverão suportar para os testes de torque e potência. As pressões determinadas para os testes serão de

5 bar, 10 bar e 15 bar. Para controle da pressão será utilizado um manômetro e o controle da temperatura se dará com o uso de um termômetro.

O sistema foi baseado no ciclo *Rankine* de geração de energia, porém o reservatório de vapor foi dimensionado para que o sistema não necessite ser enquadrado na NR 13. Para determinar a espessura da parede do reservatório utilizou-se a equação 23:

$$T = \frac{P * r}{h} \quad (23)$$

onde: T= tensão, P= pressão, r= raio e h= espessura.

Após analisar as diferentes formas e mecanismos para que se pudessem realizar as aferições necessárias para determinar-se a energia mecânica disponível no sistema, definiu-se o método do Dinamômetro de Prony como a opção mais eficaz.

A energia mecânica do sistema será obtida aplicando a equação 20 conforme descrita anteriormente:

$$\tau = F * x \quad (20)$$

onde: a força “F” é determinada pela balança de precisão na extremidade do braço de reação do dinamômetro de prony e a variável “x” a partir da distância do centro do eixo da turbina até a extremidade do braço de reação. Para o cálculo de potência, utilizou-se a equação 21.

Para uma maior precisão dos valores resultantes do cálculo de potência, o freio de prony fabricado em celeron foi conectado ao eixo de rotação da turbina, a uma distância de 0,5 m do centro do eixo, desta forma o braço de reação fabricado com um tubo de aço inoxidável permanecerá em uma posição axial.

4 RESULTADOS DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Baseando-se no ciclo termodinâmico de *Rankine*, o sistema foi projetado e dimensionado visando operar em um ciclo fechado onde se têm uma menor perda de energia. Além disso, foram adicionados equipamentos para controle e segurança para o perfeito funcionamento do sistema.

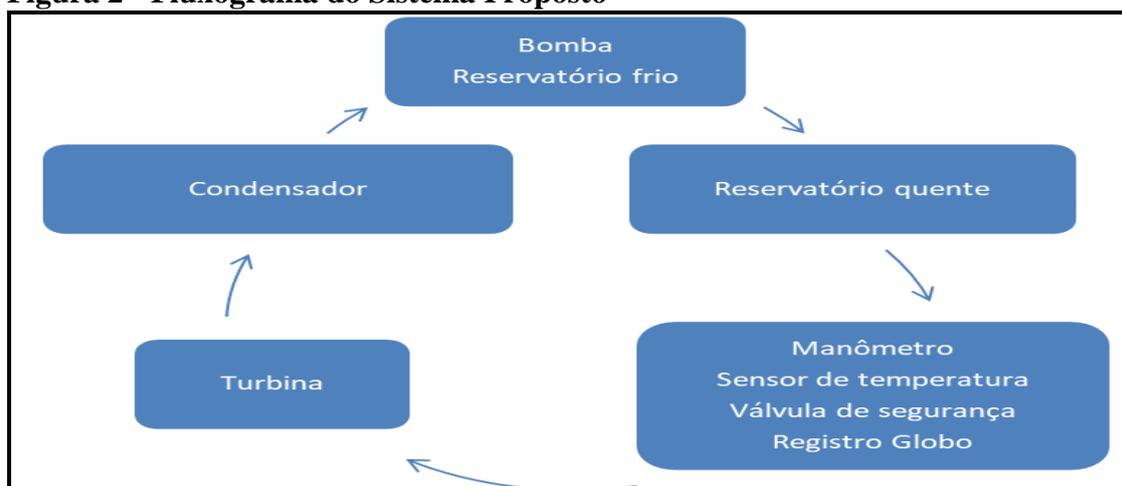
Para que o sistema fosse testado, foi necessária a fabricação de dispositivos para os efetivos cálculos de fornecimento de energia térmica e mecânica, sendo assim, o sistema é constituído pelos seguintes componentes:

- Turbina;

- Bomba d'água;
- Reservatório frio;
- Reservatório quente;
- Condensador;
- Componentes de controle, sendo eles: manômetro, válvula de registro do tipo globo, sensor de temperatura, válvula de segurança, válvula anti-retorno (reabastecimento de água).

Após a realização do levantamento de todas as peças que seriam necessárias para montagem do sistema proposto, elaborou-se um fluxograma para assim ter um melhor entendimento da preposição do sistema, com o mesmo mostrando as etapas do ciclo de funcionamento conforme a Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma do Sistema Proposto



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

O fluxograma mostra o funcionamento baseado no ciclo *Rankine*. A bomba abastece o reservatório frio, em seguida a água é deslocada ao reservatório quente, e recebe o calor gerando o vapor, nesta transição o vapor passa pelos componentes de controle até chegar na turbina.

Visando a simplificação dos componentes e também o reaproveitamento do valor expelido pela turbina após ele percorrer toda a tubulação, o vapor passará pelo condensador para que o mesmo volte a ser água, finalizando o ciclo de funcionamento retornando ao reservatório a frio.

4.1 DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS

Após definirem-se os componentes que seriam utilizados para a formação do sistema de energia, fez-se necessário o dimensionamento de cada componente, visando assim a posterior fabricação do protótipo em escala real, possibilitando os testes para a coleta de dados de potência e torque da turbina.

Os principais componentes do sistema foram exemplificados anteriormente, somente abordaremos com um melhor detalhamento a fabricação de cada item conforme abaixo descrito:

- Turbina: antes de efetivar a sua fabricação foi necessário avaliar quais eram os possíveis materiais em que poderia ser fabricada a mesma. Sendo assim, foram elencados os seguintes materiais: aço inox, alumínio e aço carbono. Comparando os materiais optou-se por utilizar o alumínio para a sua produção, em função de sua maior usinabilidade em comparação ao aço inox e por não ser afetado pela oxidação em comparação ao aço carbono. Sendo assim, definiu-se que o material, alumínio fundido, seria o utilizado para a fabricação em escala real e as medidas têm no total 170 mm.
- Bomba d'água: dimensionou-se uma bomba d'água de pressão máxima de 15 bar. Sendo assim, para que o reservatório seja reabastecido, a pressão de trabalho deverá ser inferior a este valor de pressão.
- Reservatório frio: para o dimensionamento do vaso de pressão, primeiro foi necessário definir as medidas em que ele seria fabricado, sendo assim, considerando-se os requisitos que estão na NR 13, o reservatório possuirá diâmetro de 0,15 m e 1 m de altura. Destes, 75% deverá armazenar água e os outros 25% vapor. A sua fabricação será em aço inox em função da maior durabilidade contra ferrugem. Após o cálculo para dimensionamento da espessura da parede do vaso de pressão usando a equação 23, o valor definido foi de 1,62 mm.
- Reservatório quente: o mesmo será fabricado em aço carbono, pois possui a função de armazenar a água que será transformada em vapor, a escolha do material foi devido ao mesmo ser exposto ao calor, terá diâmetro 0,15 m e altura de 0,5 m.
- Condensador: será fabricado em alumínio, estará conectado na saída da turbina para o resfriamento do vapor transformando-o em água novamente, completando o ciclo de trabalho e conectando a bomba d'água para reaproveitamento do vapor expelido pela turbina.

- Componentes de controle: os mesmos serão comprados de fornecedores locais, abaixo se especificam quais modelos foram definidos para a composição do sistema.

1. Manômetro: fabricado em aço carbono, sua pressão máxima será de 40 bar e possui diâmetro de 63 mm.

2. Registro globo: fabricado em aço inox especificamente para utilização com o fluido vapor, possui diâmetro de 12,7 mm e pressão máxima de 40 bar.

3. Sensor de temperatura: tem como objetivo o controle da temperatura do vapor, com o auxílio de um manômetro fabricado em aço carbono de 50 mm.

4. Válvula de segurança: fabricada em bronze, tem a função de proteger o sistema quando o mesmo atingir a pressão de trabalho de 10 bar.

5. Válvula de retenção: possui a função de possibilitar o reabastecimento do sistema. Fabricada em alumínio, a mesma é acoplada na entrada do reservatório frio e funciona em conjunto com a bomba d'água para realizar o contínuo reabastecimento de água no sistema.

4.2 AVALIAÇÕES NR 13

Conforme a avaliação dos requisitos necessários para a aplicação da NR 13 em sistemas de vasos de pressão, com foco na análise dos sistemas que armazenam vapor de água e com base nos valores de pressão máxima calculados, conseguimos definir que o sistema não irá se enquadrar na normativa NR 13.

Segundo INBEP, a norma regulamentadora NR 13 onde tem os seguintes itens de equipamentos abaixo destacados, deverão ser submetidos a inspeções definidas pelos códigos e normativas nacionais e internacionais a eles atribuídos, desta forma sendo isentos da normativa NR 13:

- Vasos de pressão com diâmetro interno inferior a 150 mm, para os fluidos das classes B,C,D.

4.3 ENERGIA TÉRMICA DISPONÍVEL

Posteriormente a fabricação do protótipo da turbina, acoplou-se o sistema a uma churrasqueira, sendo assim, gerando o calor necessário para a produção de vapor, e para que pudessem ser observados os dados de controle e a análise da pressão e temperatura,

destacando-se o manômetro de vapor e o termômetro, ambos acoplados a rede de vapor.

A forma de transferência de calor para avaliação do projeto é a de convecção, que ocorre quando da transformação de água em vapor. Efetuou-se o teste em condições máximas da capacidade do sistema, ou seja, elevou-se a pressão ao limite da pressão de trabalho do equipamento. O vapor manteve-se à temperatura na faixa entre 190°C e 200°C, com pressão máxima de 15 bar.

A Figura 3, mostra o protótipo da turbina projetada e fabricada para o sistema.

Figura 3 - Protótipo da Turbina



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Da forma proposta a turbina projetada foi fabricada de uma maneira simplificada com o objetivo de reduzir custos de fabricação, mas objetivando a eficácia em seu funcionamento tal como uma baixa periodicidade de manutenção.

4.4 ENERGIA MECÂNICA DISPONÍVEL

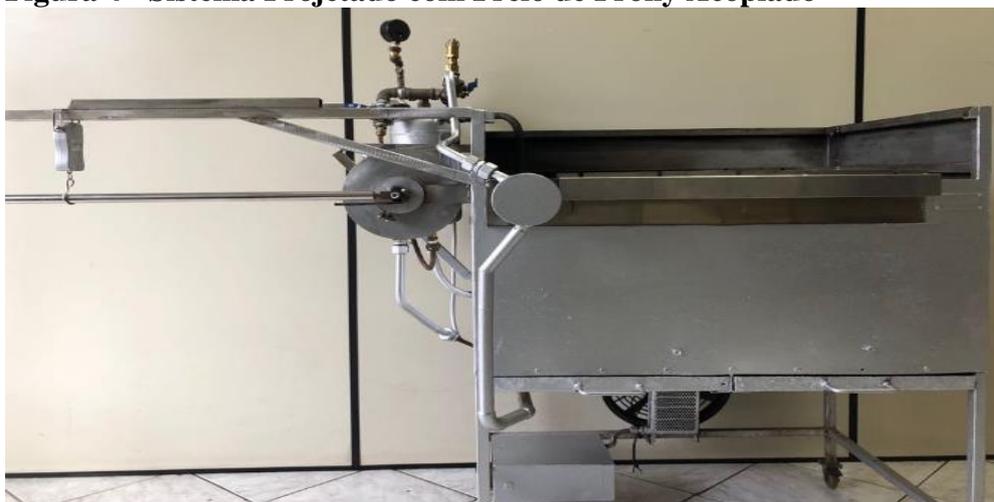
Para as aferições de torque e potência fez-se necessário a fabricação de um dinamômetro de fricção, conhecido como freio de prony. O mesmo visa controlar e medir a força exercida pelo eixo da turbina.

O objetivo de utilizar este tipo de dinamômetro é obter o valor de torque atuante no eixo da turbina. Posteriormente com a utilização de um tacômetro foi obtida a rotação em rpm

da turbina fabricada. Com os valores de torque e rotação, foi possível definir a potência da turbina projetada.

A Figura 4, mostra o sistema projetado com o freio acoplado para a realização dos testes de torque e potência gerados.

Figura 4 - Sistema Projetado com Freio de Prony Acoplado



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Conforme observado na imagem do sistema fabricado, as dimensões do conjunto cumpriram com o objetivo de se desenvolver um sistema em escala reduzida, desta forma possibilitando a instalação em locais com pouco espaço útil.

4.4.1 Resultados

Para a realização das medições com o freio de prony visando obter os dados de torque e potência, foram realizados três testes nas três diferentes faixas de pressão conforme anteriormente determinado. Os gráficos desenvolvidos representam os valores obtidos na pressão exercida pelo vapor d'água na turbina, ou seja, pela pressão do fluxo de vapor gerado pelo sistema proposto. Na Tabela 1, se identifica os valores obtidos com estas diferentes faixas de pressão de testada.

Tabela 1 - Valores Obtidos no Dinamômetro

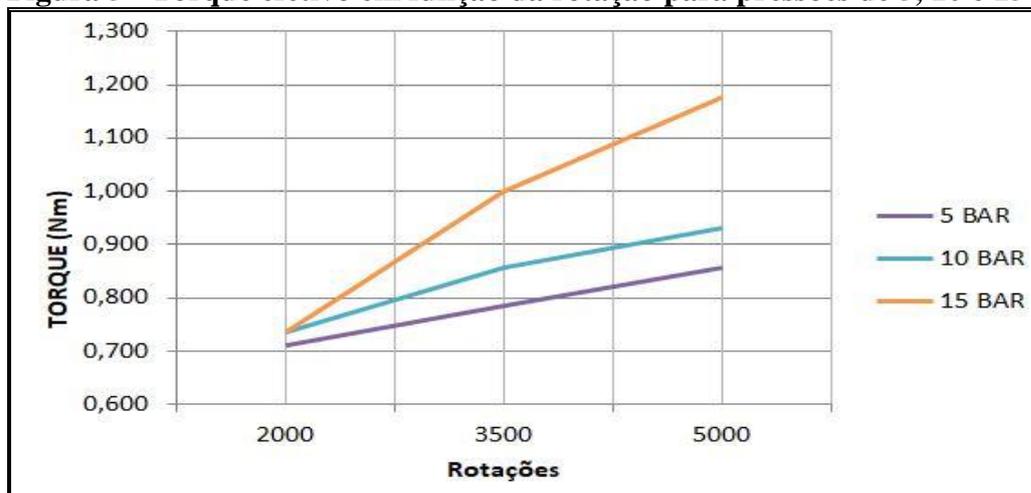
Pressão (Bar)	Força no Freio De Prony (N)	Torque (Nm)	Rotação (rpm)	Potência (kW)
5	1,421	0,710	2000	0,149
5	1,568	0,785	3500	0,287

5	1,715	0,858	5000	0,45
10	1,47	0,735	2000	0,153
10	1,715	0,858	3500	0,314
10	1,862	0,931	5000	0,487
15	1,47	0,735	2000	0,153
15	2,00	1,00	3500	0,366
15	2,352	1,176	5000	0,614

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Ademais, as Figuras 5 e 6 descrevem as diferentes configurações de funcionamento da turbina nas diferentes pressões testadas no dinamômetro.

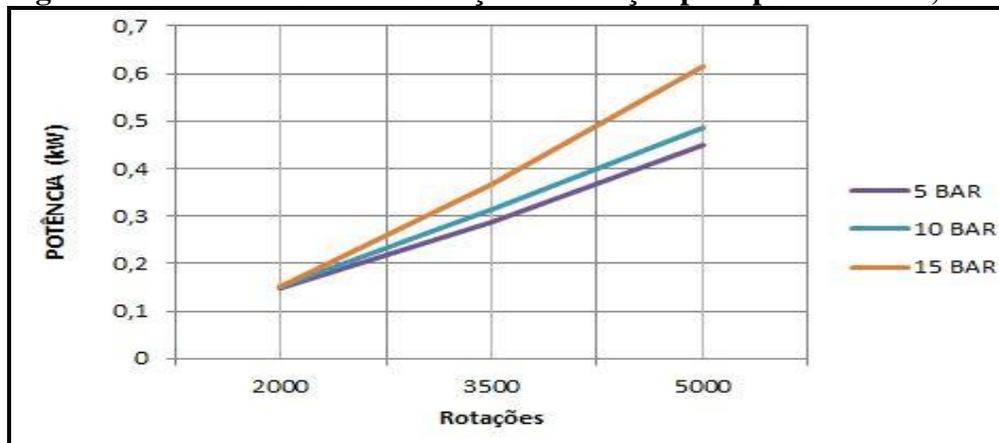
Figura 5 - Torque efetivo em função da rotação para pressões de 5, 10 e 15 bar



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Para as pressões testadas no dinamômetro o máximo torque obtido foi de 1,176 Nm, utilizando a equação 24 para determinar o torque, para uma rotação da turbina de 5000 rpm com 15 bar de pressão. A Figura 6, representa a potência máxima fornecida pela turbina.

Figura 6 - Potência efetiva em função da rotação para pressões de 5, 10 e 15bar



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Aplicando a equação 21 nos valores obtidos no dinamômetro de prony, a potência máxima encontrada foi de 0,614 kW para uma rotação da turbina de 5000 rpm em 15 bar de pressão.

4.5 CUSTOS PARA FABRICAÇÃO

Um ponto fundamental para considerar a fabricação em série do sistema de transformação de energia é o levantamento dos custos de fabricação. Por mais bem projetado e desenvolvido que o sistema seja, se o mesmo não possuir um preço competitivo para ser comercializado, dificilmente este equipamento será produzido em grande escala.

Desta forma a Tabela 2, indica os valores para fabricação dos principais componentes do sistema.

Tabela 2 - Custos Para Implantação do Projeto

COMPONENTE	CUSTO DE FABRICAÇÃO	
Turbina	R\$	500,00
Bomba d'água	R\$	168,00
Reservatório Frio (Vaso de Pressão)	R\$	250,00
Reservatório quente (caldeira)	R\$	160,00
Condensador	R\$	150,00
Manômetro	R\$	70,00
Válvula de registro globo	R\$	120,00
Sensor de temperatura	R\$	100,00
Válvula de segurança	R\$	220,00
Válvula anti-retorno	R\$	50,00
Componentes diversos	R\$	150,00
Total	R\$	1.938,00

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Observando a Tabela 2, de custos é considerando os valores de equipamentos similares comercializados no mercado atualmente, o sistema proposto poderia ser fabricado em série com um preço competitivo para comercialização.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo proposto especificou e apresentou o desenvolvimento de um sistema simplificado de conversão de energia térmica em energia mecânica, com o potencial objetivo de utilização em diferentes setores, residenciais, comerciais ou industriais.

A partir de todas as pesquisas realizadas para o desenvolvimento do sistema, objetivou-se a fabricação de cada componente para a realização dos testes específicos para

determinar o rendimento da turbina. Com os valores obtidos pode-se afirmar que o projeto alcançou êxito no objetivo de desenvolver o sistema de transformação e geração de energia em escala reduzida, produzindo uma força torque que poderá ser aplicada em diferentes meios para gerar energia na forma mecânica.

Com base nos dados coletados com a utilização do freio de prony, destacamos algumas possíveis aplicações para o sistema: instalação em um comércio, onde carvão pode ser utilizado para a geração do vapor e posteriormente realizar a rotação dos espetos. Poderá ser utilizado em locais onde não se tem disponível energia elétrica, possibilidade de acoplamento no eixo da turbina de elementos para desbaste de metais, ou seja, o eixo pode ser funcional com um “esmeril”, pode se acoplar um dínamo para a geração de energia elétrica, possibilitando o funcionamento de lâmpadas e carregamento de baterias de pequeno porte.

Analisando os valores obtidos na aplicação dos dispositivos e equações utilizadas para definir os valores referentes a torque e potência da turbina projetada, a faixa ideal de funcionamento do sistema seria de 5 bar de pressão, à uma rotação de 5000 rpm, gerando 0,858 Nm de torque e aproximadamente 0,450 kW de potência ou aproximadamente 0,6 cv.

Ponderando o objetivo de projetar um sistema simplificado de transformação de energia térmica em energia mecânica, conclui-se considerando a grande importância de novas pesquisas e desenvolvimento de novas fontes de energia ou pelo aperfeiçoamento de sistema a muito tempo utilizados, sempre buscando o equilíbrio para que a máquina ou equipamento desenvolvido tenha em seu projeto a sustentabilidade como um dos objetivos em seu requisito.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Luiz Eduardo Nunes de. **Automatização de um Dinamômetro Hidráulico para Ensaios de Motores de Combustão Interna**. Brasília, 2015.

ALMEIDA, Rogério Fabiano. **Aplicação da NR – 13 em Vasos de Pressão: Estudo de Caso em Tanques Criogênicos em Quatro Indústrias de Curitiba – PR**. Curitiba, 2014.

BRASIL. **NR-13 – Manual Técnico de Caldeiras e Vasos de Pressão**. ed. Comemorativa 10 anos da NR-13 (da Portaria nº 23/94). Brasília: Ministério do Trabalho.

BRASIL, Alex N. **Teoria Geral das Máquinas de Fluxo**. 2006.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de Calor e Massa – Uma abordagem prática**. Ed. AMGH, Porto Alegre, 2012

ÇENGEL, Yunus A. ; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. Ed. AMGH, Porto Alegre, 2013.

FALCÃO, Carlos. **Projeto Mecânico Vasos de Pressão e Trocadores de Calor Casco e Tubos**. 2002.

FREITAS, Anderson Rodrigo de. **Freio de Prony**. Campinas, 2009.

FERRAZ, Fabio. **Turbinas a Vapor**. Unijui, 2008. Disponível em: <<https://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/08/turbinas-a-vapor.pdf> - Acessado em 18 de novembro de 2017.

FONTENELLE, Marcellus. **O Ciclo de Rankine**. Xanxerê, 2013.

GIL. Antônio Carlos Gil; **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5°. Ed. São Paulo. Atlas, 1999.

GRUGER, Márcio André. **Dimensionamento de um trocador de calor auxiliar para um veículo modelo saveiro diesel**. Horizontina, 2014.

INCROPERA, Frank P. *et al.* **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2011

KLEIN, Magnos Rodrigo. **Dimensionamento de um Sistema Hidráulico com Vazão Variável para Acionamento do Espalhador de Palha de uma Colheitadeira de Grãos**. Horizontina, 2014.

MÁQUINAS a vapor in artigos de apoio **Infopédia** [em linha]. Porto: Porto Editora 2003 – 2017. Disponível em [https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/\\$maquina-a-vapor](https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/$maquina-a-vapor). Acessado em 19 de outubro de 2017.

MORAN, Michael J. *et al.* **Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos: Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor**. Ed. LTC. Rio de Janeiro, 2013.

RAMPAZZO. Sônia Elizete Rampazzo; COREA. Fernanda Zanin Mota Corrêa. **Desmitificando a Metodologia Científica**. – Erechim, RS , Habilis, 2008. 200p

ROESCH, S. M. de A. **Projetos de Estágio do curso de Administração**. São Paulo: Atlas, 1996

NASH, William A; POTTER, Merle C. **Resistência dos Materiais**. – Porto Alegre: Bookman, 2014.

TELLES, Pedro C. Silva. **Vasos de Pressão**. Rio de Janeiro: LTC,2001.

TOMAZINI, Guilherme Abreu. **Diretrizes básicas para projetos de vasos de pressão segundo a ASME**. Guaratinguetá, 2015.

TURRA, Gabriel. Desenvolvimento de um Dinamômetro para a Bancada Didática do tipo Turbina Pelton. Horizontina, 2014.