

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FELIPE ROSSATO DE SOUZA**

**BANCADA DIDÁTICA DE MÁQUINA A VAPOR**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2017**

FELIPE ROSSATO DE SOUZA

## **BANCADA DIDÁTICA DE MÁQUINA A VAPOR**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli Júnior

PATO BRANCO

2017

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### BANCADA DIDÁTICA DE MÁQUINA A VAPOR

Felipe Rossato de Souza

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 16/11/2017 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

---

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Adelino Carlos Maccarini  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli Junior  
(UTFPR)  
Orientador

---

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai Edison Antônio de Souza, a minha mãe Valdiva Rossato de Souza, a minha irmã Fernanda Rossato de Souza, a minha avó materna Maria Rosa Rossato, ao meu filho Pedro Aguiar de Souza e a minha fiel companheira Jeniffer Machado de Aguiar.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Dr. Luiz Carlos Martinelli Junior pela contribuição, orientação, ensinamentos e direcionamento deste trabalho.

Aos demais professores do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – campus Pato Branco, pelo apoio dado, conhecimento compartilhado, paciência e por acreditarem no fantástico trabalho que exercem nessa instituição.

Aos meus familiares e amigos, em especial Edison Antônio de Souza, Valdiva Rossato de Souza, Fernanda Rossato de Souza, Maria Rosa Rossato, Viviane Rossato, Nelsi da Rosa Fiel e Raul da Rosa Fiel que sempre estiveram presentes me dando apoio e suporte para eu alcançar meus objetivos.

A Jeniffer Machado de Aguiar e Pedro Aguiar de Souza que em pouco tempo me proporcionam todo o apoio de que preciso para continuar correndo atrás de sonhos e realizações.

## EPÍGRAFE

Quando aceitamos nossos limites,  
consequimos ir além deles.

Albert Einstein

## RESUMO

SOUZA, Felipe Rossato de. **Bancada didática de máquina a vapor**. 2017. 62f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

Este trabalho elenca definições de propriedades termodinâmicas com o objetivo de auxiliar professores e estudantes de diferentes níveis de escolaridade no entendimento de ciclos termodinâmicos, em específico o ciclo de Rankine. Nele é apresentado o diagrama de Mollier (pressão x entalpia) representando as fases de transformação da água e seu comportamento perante a termodinâmica. Nesse sentido, apresenta-se o projeto de construção de uma bancada didática de máquina a vapor onde são calculados pressão e temperatura de trabalho, espessura de parede de vasos de pressão, potência de trabalho, carga térmica necessária, velocidade de escoamento do vapor e eficiência térmica ao final do ciclo, com o principal intuito de verificar o comportamento dos equipamentos presentes. São realizadas considerações para que a bancada possa ser didática, contando com a presença de manômetros para a leitura da pressão e termômetros para a leitura da temperatura em diferentes etapas do processo. A segurança estará à frente dos objetivos deste projeto pois conta com válvulas de controle, os próprios equipamentos de leitura que identificam se não há perigo de explosões e isolamento térmico que evita que pessoas se queimem devido às altas temperaturas, melhorando também o rendimento do equipamento, de forma a serem evitadas perdas de carga e a elevada formação de condensado devido a transformação térmica. Ao final do trabalho é listado o resultado dos cálculos realizados para projetar a bancada didática em diferentes tempos de transformação de água do estado líquido em vapor, levando em conta a necessidade de utilização, além de propor a sua construção efetiva.

**Palavras-chave:** Propriedades termodinâmicas. Ciclo de Rankine. Bancada didática. Segurança.

## ABSTRACT

SOUZA, Felipe Rossato de. **Steam machine didactic workbench**. 2017. 62p. Course Completion Work – Mechanical Engineering Course, Technological Federal University of Paraná. Pato Branco. 2017.

This work lists definitions of thermodynamic properties with the objective of assisting teachers and students of different levels of schooling in the understanding of thermodynamic cycles, specifically the Rankine cycle. In it, the Mollier diagram (pressure x enthalpy) representing the phases of water transformation and its behavior in the face of thermodynamics is presented. In this regard, is presented the project of the construction of a didactic workbench of a steam machine where working temperature and pressure, pressure vessel wall thickness, working power, required thermal load, vapor flow velocity and thermal efficiency at the end of the cycle are calculated, with the main purpose of verifying the behavior of the present equipment. Considerations are made so that the workbench can be didactic, counting on the presence of pressure gauges and thermometers for the pressure and temperature readings in different stages of the process. Safety will be the main point of this Project, the reading equipment itself that identifies if there is no danger of explosions and thermal insulation that prevents people from burning due to high temperatures, also improving the efficiency of the equipment, in order to avoid loss of charge and the high formation of condensate due to thermal transformation. At the end of the work, the results of the calculations carried out to design the didactic workbench in different times of transformation of water from liquid to vapor are listed, taking into account the necessity of use, as well as proposing its effective construction.

**Keywords:** Thermodynamic properties. Rankine Cycle. Didactic workbench. Safety.



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Diagrama de Mollier (Pressão x Entalpia).....	35
Gráfico 2 – Diagrama de Mollier (Temperatura x Entropia).....	35

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela com propriedades termodinâmicas da água saturada em função da pressão.....	37
Tabela 2 – Dimensões tubo SCH 40.....	46
Tabela 3 – Variação dos cálculos apresentados em diferentes escalas de tempo.....	57

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pressões absoluta, manométrica e de vácuo.....	18
Figura 2 – Diagrama P – V do ciclo de Carnot.....	23
Figura 3 – (a) Os componentes principais e (b) o diagrama T-s para o ciclo de Rankine.....	25
Figura 4 – Esquematização do manômetro de Bourdon.....	26
Figura 5 – Tipos de tubos Bourdon. a) tubo tipo C, b) tubo espiral, c) tubo helicoidal.....	27
Figura 6 – Manômetro de Bourdon.....	27
Figura 7 – Válvula de segurança e alívio de pressão.....	28
Figura 8 – Bomba manual e válvula de retenção.....	33
Figura 9 – Bomba manual e válvula de retenção.....	40
Figura 10 – Dimensões da caldeira.....	42
Figura 11 – Termômetro industrial bimetálico.....	43
Figura 12 – Válvula Globo em y com operação por meio de volante	43
Figura 13 – Visor tubular.....	44
Figura 14 – Válvula esfera.....	44
Figura 15 – Isolamento térmico externo.....	49
Figura 16 – Turbina Pelton.....	51
Figura 17 – Cubo Dínamo.....	52
Figura 18 – Manômetro de curto alcance.....	53
Figura 19 – Componentes típicos de um trocador de calor resfriado a ar.....	54
Figura 20 – Condensador compacto de refrigeração a ar.....	55

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	15
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO .....	15
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
3.1 PRESSÃO .....	17
3.2 ENTALPIA .....	18
3.3 ENTROPIA .....	20
3.4 TRABALHO E POTÊNCIA .....	21
3.5 MÁQUINAS TÉRMICAS E CICLO DE CARNOT .....	22
3.6 CICLO DE RANKINE .....	24
3.7 DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA .....	25
3.7.1 Manômetro de Bourdon .....	26
3.7.2 Válvula de segurança e alívio de pressão .....	27
3.7.3 Isolamento térmico .....	29
3.8 GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO .....	29
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>31</b>
4.1 MATERIAIS E MÉTODOS .....	31
4.2 GERAÇÃO DE VAPOR .....	32
4.2.1 Combustível .....	32
4.2.2 Abastecimento de água .....	32
4.2.3 Caldeira .....	33
4.2.3.1 Materiais .....	33
4.2.3.2 Dimensões .....	34
4.2.3.3 Tipos de vapor .....	34
4.2.3.4 Carga térmica .....	36
4.2.3.5 Espessura de parede .....	40
4.2.3.6 Dispositivos de controle .....	42
4.3 DISTRIBUIÇÃO .....	45
4.3.1 Quantidade de condensado .....	47
4.4 ISOLANTE TÉRMICO .....	48
4.5 USO FINAL .....	50
4.6 RECUPERAÇÃO .....	53
4.7 EFICIÊNCIA TÉRMICA .....	56

<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>57</b>
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>59</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>60</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As máquinas térmicas estão presentes de forma significativa em nossas vidas. Desde o século XVII as máquinas a vapor vêm transformando a indústria a nível mundial de forma a utilizar seus conceitos para locomoção, geração de energia elétrica, geração de trabalho, dentre outros.

Por se tratar de um dispositivo capaz de, através de uma fonte de calor, converter o aumento de energia interna de um certo combustível em energia mecânica realizando desta forma trabalho, as máquinas térmicas vão desde máquinas a vapor até máquinas de combustão interna, e estas são capazes de movimentar outros dispositivos devido à expansão térmica. Tudo isso ocorre de diferentes maneiras possíveis, porém nunca se pode esquecer que tal conversão nunca será algo totalmente eficaz, ou seja, num processo de transformação térmica sempre haverá perda de energia para o meio ou para uma fonte fria, e tudo isso é explicado quando analisa-se principalmente a segunda lei da termodinâmica.

Em se tratando de termodinâmica, neste trabalho será evidenciado o ciclo de Rankine, o qual trabalha com baixa pressão de condensação e altas temperaturas que entram na turbina, para que, a partir dessa, ocorra a geração de trabalho. Todos os equipamentos necessários para a transformação de energia e suas características estarão evidenciadas de forma quantitativa com o intuito de explorar as propriedades mecânicas e a partir delas ter uma melhor compreensão para exemplificar como as propriedades termodinâmicas são inseridas no contexto e em que elas interferem em cada etapa do ciclo. No decorrer do estudo, foram realizadas algumas hipóteses para facilitar o entendimento de seu funcionamento.

Com seu desenvolvimento, pretende-se proporcionar um material que seja referência para a efetiva construção de uma bancada didática de máquina a vapor com o objetivo de exemplificar de uma forma simples o funcionamento de ciclos termodinâmicos.



## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um projeto de uma bancada didática de máquina a vapor com o intuito de fornecer dados cabíveis à uma possível fabricação da mesma, levando em conta aspectos de funcionalidade e segurança além de proporcionar dados técnicos relevantes dos possíveis equipamentos que possam vir a ser utilizados.

### 2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Enquanto objetivos específicos, este estudo se propõe a:

- Obter resultados que condizem com a realidade;
- Possibilitar a presença de equipamentos que possam ser encontrados no mercado;
- Propor diferentes escalas de tempo de geração de vapor para a transformação de energia de acordo com cada necessidade;
- Desenhar um esquema da bancada didática com principais medidas e especificação dos equipamentos em um software CAD.





### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Primeiramente serão analisados quais as principais propriedades termodinâmicas que estarão inseridas no estudo do ciclo em evidência. Juntamente à isso serão apontados os principais equipamentos de segurança que estarão presentes no projeto além de identificar e caracterizar o combustível a ser utilizado como fonte de calor.

#### 3.1 PRESSÃO

Quando se é referido a gases e líquidos define-se pressão como sendo a distribuição numa área de força normal empurrando contra a superfície (Potter e Scott, 2007), ou, nas palavras de Çengel (2006), como uma força exercida por um fluido por unidade de área. Para os sólidos a pressão é definida como tensão normal, porém a primeira definição é a qual nos interessa neste trabalho.

A pressão desempenha um papel importante dentro do sistema termodinâmico apresentado e tem a capacidade de modificar as características do fluido utilizado dependendo de sua posição no mesmo. Para medi-la as seguintes unidades são utilizadas: Pascal, bar, atmosfera padrão, quilograma força por centímetro quadrado (mais utilizadas na Europa) e libra-força por polegada quadrada (mais utilizada no sistema inglês). Tais unidades de medida de pressão são detalhadas abaixo:

$$Pa = N/m^2$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 101,325 \text{ kPa} = 101325 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 9,807 \times 10^4 \text{ N/m}^2 = 9,807 \times 10^4 \text{ Pa} = 0,9807 \text{ bar} = 0,9679 \text{ atm}$$

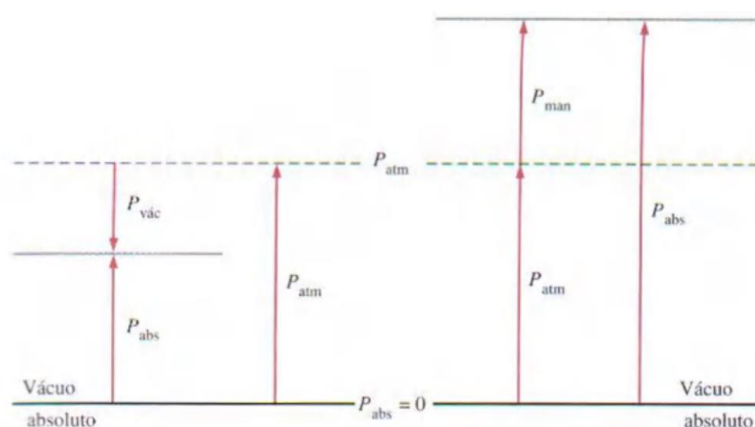
$$1 \text{ atm} = 14,696 \text{ lbf/pol}^2 \text{ ou psi (pounds per square inch)}$$

Com toda essa gama de unidades de medida de pressão que é possível utilizar, deve-se saber como classificar as pressões e saber como usá-las de acordo com as relações termodinâmicas. Primeiramente é discutida a **pressão absoluta**, a qual trata-se da pressão real em determinada posição e é medida com relação ao vácuo absoluto (Çengel, 2006). Considerando que muitos

dispositivos que medem a pressão são calibrados para ler o zero na atmosfera, eles irão mostrar a medida da **pressão manométrica**, a qual nada mais é que a diferença entre a pressão absoluta e atmosférica no local de medição. Para a obtenção da medida desta última pressão citada são utilizados manômetros, os quais serão detalhados mais à frente no tópico de dispositivos de segurança. Por último não pode-se deixar de citar a **pressão de vácuo**, que segundo Potter e Scott (2007), é como é chamada uma pressão manométrica negativa, ou seja, abaixo da pressão atmosférica, e os medidores capazes de ler pressões negativas são designados de *manômetros de vácuo*, os quais indicam a diferença entre pressão atmosférica e absoluta.

Para melhor entendimento a Figura 1 mostra a diferença entre pressões absoluta, manométrica e de vácuo.

**Figura 1 – Pressões absoluta, manométrica e de vácuo.**



Fonte: Çengel, 2006

### 3.2 ENTALPIA

A entalpia é utilizada principalmente em estudos que envolvem refrigeração e geração de potência (Çengel, 2006). Trata-se de uma propriedade do sistema onde seus valores são listados em tabelas de vapor e são representados pela letra  $h$  (kJ/kg), que se trata da entalpia específica (por unidade de massa). Porém para um sistema, torna-se mais interessante calcular-se a entalpia em todo o seu processo de transformação. Tal processo é chamado de entalpia total  $H$  (kJ) e ambas são calculadas pelas equações abaixo:

$$h = u + Pv \quad (3-1)$$

ou,

$$H = U + PV \quad (3-2)$$

Onde  $u$  representa a energia interna do sistema,  $P$  a pressão (constante) e  $V$  o volume do mesmo. Neste caso  $PV$  mensura o trabalho que é executado sobre o sistema pela vizinhança.

Para definir a entalpia deve-se levar em consideração um sistema a pressão constante em que, segundo Potter e Scott (2007, p. 77), “a diferença das entalpias entre dois estados corresponde ao calor transmitido”. Tal definição requer um processo nessas determinadas condições devido ao fato de que em um processo de não-equilíbrio a pressão constante a variação de entalpia não poderia ser definida dessa forma, ou seja, não seria igual ao calor. É exatamente por isso que a variação de entalpia é dependente de alguns fatores como número de mol, estado físico, temperatura e pressão.

A entalpia pode ter reações tanto exotérmicas quanto endotérmicas. Caso a variação de entalpia de um sistema seja negativa segundo a Equação (3-3), ocorreu uma liberação do calor dentro desse sistema e trata-se então de uma reação exotérmica. Por outro lado, caso haja uma variação de entalpia positiva, ocorreu a absorção de energia, sendo assim a reação é endotérmica.

$$\Delta H = H_{inicial} - H_{final} \quad (3-3)$$

Tendo isso em mente deve-se citar a partir de qual referencial é comparada a entalpia de uma substância, e este é denominado entalpia padrão ( $\Delta H$  em kJ), o qual é calculado considerando o estado mais estável dessa substância, considerando pressão e temperatura constantes.

### 3.3 ENTROPIA

Segundo Potter e Scott (2007), “para nos permitir aplicar de forma quantitativa a segunda lei da termodinâmica para um processo, pode-se identificar uma propriedade chamada *entropia*”. Tal propriedade é um conceito abstrato que auxilia no entendimento de observações experimentais termodinâmicas.

Para entender melhor o conceito de entropia deve-se lembrar que a segunda lei da termodinâmica se refere muitas vezes em seu estudo a desigualdades. Como é evidenciado em máquinas térmicas, por exemplo, quando se trata de ciclos reversíveis ou irreversíveis. A partir daí, o físico alemão R. J. E. Clausius (1822-1888), realizando experimentos e utilizando desta forma a *desigualdade de Clausius*, descobriu em 1865 que havia descoberto uma nova propriedade termodinâmica observando que a integral cíclica de uma propriedade (como o volume por exemplo) é nula, e quando isso ocorre tal grandeza depende apenas do *estado* e não da trajetória do processo (Çengel, 2006). Conclui-se desta forma que, de um modo mais simples de se entender, em um sistema físico a entropia representaria a medida de desordem de suas partículas, ou seja, ela aumenta de acordo com a imprevisibilidade das moléculas, e é por isso que a entropia é mais alta na fase gasosa de uma substância do que em sua fase sólida.

Ao realizar este estudo, o principal interesse está na variação de entropia ao invés da própria entropia dita, devido às comparações que serão realizadas entre estados final e inicial das substâncias. De mesmo modo é possível encontrar tais valores de entropias em tabelas termodinâmicas especificadas para cada substância, onde ela é designada pela letra *s* e sua unidade de medida é kJ/kg·K. Sua variação pode ser calculada e descrita pelo símbolo  $\Delta S$  e representado pela unidade (kJ/K). A Equação (3-4), segundo Çengel (2006), identifica o processo onde a variação de entropia nada mais é que a divisão entre o calor transferido durante o processo internamente reversível *Q* pela temperatura constante do sistema  $T_0$ .

$$\Delta S = \frac{Q}{T_0} \quad (3-4)$$

No presente estudo será utilizada tal propriedade para determinar transformações que ocorrem no ciclo em destaque (Rankine), mostrando que em algumas fases do ciclo a entropia varia e em outros ela se mantém constante (transformação isentrópica).

### 3.4 TRABALHO E POTÊNCIA

Quando se analisa a ação de uma força através de um determinado deslocamento obtém-se a definição de *trabalho* ( $W$ ), e este pode ser encontrado e aplicado de diversas formas diferentes, como por exemplo em eixos, em molas, barras sólidas elásticas, quando associado ao alongamento de um filme líquido, quando se acelera um corpo, entre outros (Çengel, 2006).

Novamente segundo Potter e Scott (2007), “trabalho pode ser pensado como energia transferida através das fronteiras de um sistema”. Tal definição está melhor empregada dentro da termodinâmica, e portanto será a definição em destaque neste trabalho.

Para determinar se um trabalho realizado é positivo ou negativo deve-se analisar se tal trabalho foi realizado pelo sistema (positivo) ou se o trabalho foi realizado sobre o sistema (negativo). Wylen, Sonntag e Borgnakke (1995) nos dão como exemplo o trabalho realizado por um gás em expansão contra um êmbolo (em um motor a combustão interna por exemplo), onde no caso existe trabalho positivo e a energia produzida é retirada do sistema. Por outro lado, quando um êmbolo comprime um gás ele está realizando trabalho negativo e desta forma acrescenta energia ao sistema.

Para melhor entendimento a respeito de trabalho, suas unidades de medidas mais utilizadas são estabelecidas. A definição diz que trabalho é o produto de uma unidade de força que age através de uma distância unitária, que nas unidades do sistema internacional (SI) refere-se ao Newton (N) e ao metro (m), e que o resultado final de tal produto proporciona o Joule (J), como mostrado abaixo.

$$1J = 1N.m \quad (3-5)$$

O que difere no sistema de unidades inglês é que o trabalho é medido em lbf.ft/s (pound force foot/second).

Quando se quer analisar a taxa de trabalho por tempo, define-se o que é chamado de *potência* ( $\dot{w}$ ), onde o tempo será expresso em segundo (s), ou seja, a potência tem como unidades joules por segundo (J/s), onde também é chamada de watt (W).

$$1 \dot{W} = 1 J/s \quad (3-6)$$

Além das definições citadas acima também é possível associar trabalho à unidade de massa que é representado por  $w$  (J/kg):

$$W = \frac{E}{m} \quad (3-7)$$

Onde é realizada uma análise dimensional das grandezas físicas e estas são representadas por símbolos. Além da energia e da massa, outras grandezas físicas podem ser representadas por diferentes símbolos como mostrado:

- Energia – E
- Tempo – t
- Massa – m
- Comprimento – L
- Temperatura – T

### 3.5 MÁQUINAS TÉRMICAS E CICLO DE CARNOT

“Máquina térmica é um dispositivo capaz de realizar trabalho convertendo energia térmica em energia mecânica” (Sears e Zemansky, 1973). Ao se falar sobre máquinas térmicas sabe-se que elas trabalham em ciclos termodinâmicos e estes funcionam entre duas fontes térmicas, onde o calor é absorvido de uma fonte quente e rejeitado para uma fonte fria onde é obtido o trabalho (Franklin, 2016). Mesmo tendo o conhecimento da existência de diferentes tipos de ciclos termodinâmicos como o ciclo Otto, o ciclo Diesel e o ciclo de Stirling por exemplo,

aqui será levado em conta para começo de análise o ciclo de Carnot, o qual é considerado um ciclo termodinâmico ideal.

O ciclo de Carnot trata-se de um ciclo reversível e idealizado onde o fluido utilizado é um gás perfeito e através dele ocorrem duas transformações isotérmicas e duas adiabáticas conforme mostrado na Figura 2.

Os processos neste ciclo são:

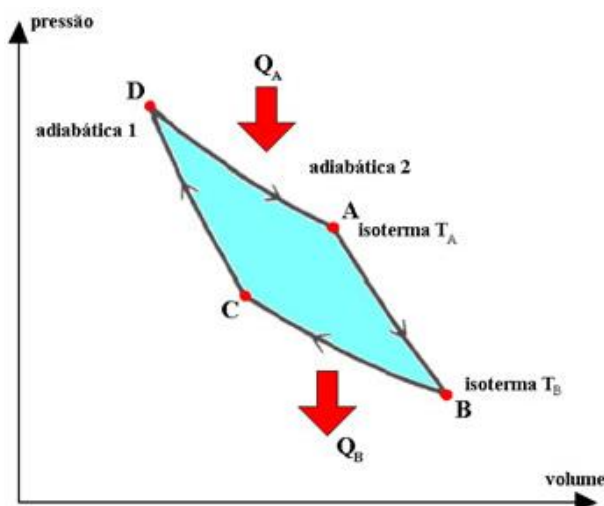
Expansão isotérmica DA onde o gás que está em contato com a fonte quente ( $T_A$ ) retira energia dessa e recebe uma quantidade de calor  $Q_A$ .

Expansão adiabática AB onde não ocorre trocas de calor do gás com o ambiente pois há somente diminuição de energia interna do sistema e dessa forma diminuição de temperatura.

Compressão isotérmica BC onde o gás que está em contato com a fonte fria ( $T_B$ ) cede energia para esta e proporciona uma quantidade de calor  $Q_B$ .

Compressão adiabática CD onde não ocorre trocas de calor do gás com o ambiente pois há somente aumento de energia interna do sistema e dessa forma aumento de temperatura.

Figura 2 – Diagrama P-V do ciclo de Carnot



Fonte: Silva, 1980

Por não se tratar de um ciclo de potência a vapor real, pois ele não pode ser aproximado na prática por ter baixa eficiência térmica e possuir turbinas sujeitas a mudança de fase (Franklin, 2016), este estudo se baseará no ciclo a



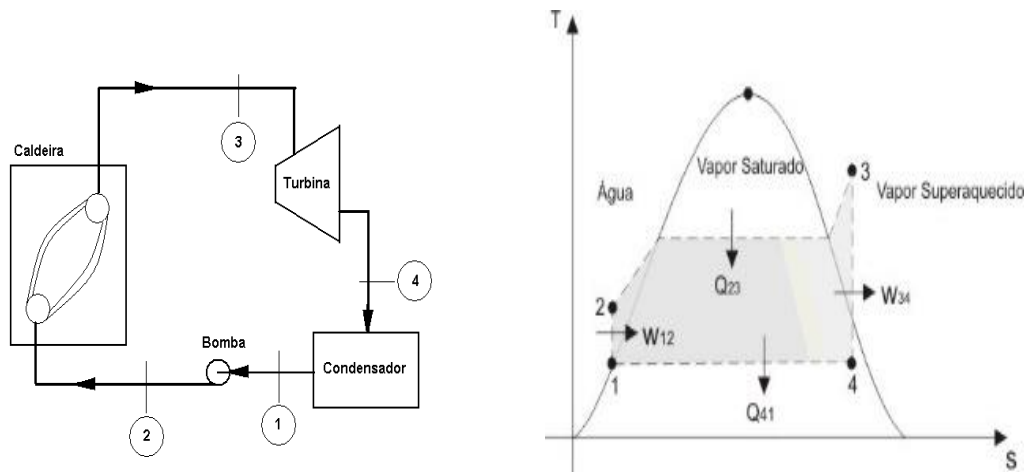
vapor de Rankine, o qual trata-se de um modelo ideal de processos reversíveis e é o principal ciclo termodinâmico utilizado mundialmente para a produção de eletricidade, além de ter a liberdade de trabalhar com uma grande variedade de fluidos.

### 3.6 CICLO DE RANKINE

O ciclo a ser estudado trata-se de um ciclo de produção de potência (Moran e Shapiro, 1996) onde sua operação é realizada a partir de um fluido de trabalho que se transforma do estado líquido para o estado de vapor e vice versa (Potter e Scott, 2007).

Segundo Wylen, Sonntag e Borgnakke (1995), o ciclo é baseado em quatro processos que ocorrem em regime permanente (Figura 3). Admite-se que no estado 1 tem-se líquido saturado, ou seja, água a baixa pressão, onde no processo 1-2 ocorre a elevação da pressão da água pela bomba, continuando o trajeto aumentando a temperatura da água até o estado de saturação e que após isso ocorre a mudança de fase da água na caldeira (também chamado de gerador de vapor) a qual passa a ser vapor a alta pressão. Entre a linha de saturação do vapor e o ponto 3 da figura ocorre o superaquecimento do vapor para que ocorra uma expansão adiabática na turbina regando trabalho e retornando o fluido a baixa pressão. Neste ponto, não deve haver a presença de líquido dentro da turbina pois este pode causar erosão nas palhetas. No ponto 4 o vapor se encontra no estado saturado e ao passar pelo condensador no processo 4-1 ele se condensa, onde retoma seu estado de água a baixa pressão e reinicia todo o processo.

Figura 3 – (a) Os componentes principais e (b) o diagrama  $T-s$  para o ciclo de Rankine.



Fonte: Wylen et al. (1995) e Potter e Scott (2007).

A partir do gráfico na Figura 3b é possível calcular o trabalho realizado pelo ciclo através da área englobada pela região 1-2-3-4-1, isso se forem ignoradas as mudanças de energia potencial e cinética.

Contudo, sabe-se que é possível aumentar a eficiência térmica do ciclo aumentando a pressão de trabalho na caldeira, o que também eleva a pressão na entrada da turbina, com o aumento da temperatura de saída na caldeira ou diminuindo a pressão de saída da turbina, isso tendo em vista os limites impostos na prática devido a materiais e equipamentos. Porém, tal aplicação não será realizada neste projeto.

Se for considerado um ciclo de Rankine ideal, todos os processos devem ser reversíveis. Entretanto em um ciclo de Rankine real a expansão na turbina e a compressão pela bomba não são isentrópicos e tampouco adiabáticos, ou seja, estes processos não são reversíveis, mas por questões didáticas os cálculos e considerações feitos aqui serão baseados em um ciclo ideal, onde não há perdas de pressão na caldeira e nem no condensador.

### 3.7 DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA

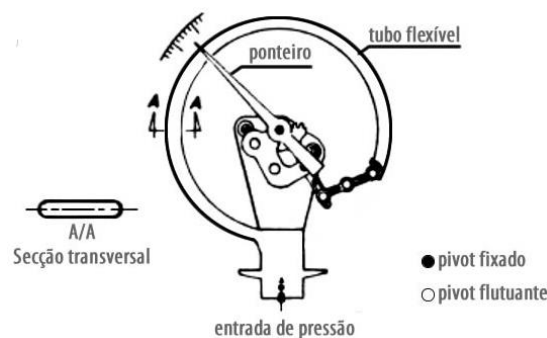
Para efeitos de proteção aos usuários é importante que se façam presente dispositivos de segurança, os quais são discutidos abaixo.

### 3.7.1 Manômetro de Bourdon

Alguns equipamentos que são capazes de realizar a medição de pressão estão presentes a longa data no mercado. Eles podem ser o manômetro de coluna, o manômetro de Bourdon, os transdutores piezelétricos, os de diafragma e os barômetros por exemplo. Porém, para o estudo realizado será destacado o manômetro de Bourdon, por ser amplamente utilizado em aplicações de máquinas a vapor e por estar presente neste projeto.

O manômetro de Bourdon foi inventado em 1852 e tem esse nome devido ao engenheiro e inventor francês Eugene Bourdon (1808 – 1884), que segundo Çengel (2006), “consiste em um tubo de metal oco torcido como um gancho, cuja extremidade é fechada e conectada a uma agulha indicadora”. Tal tubo de metal oco fica de forma estacionária quando nenhuma pressão além da atmosférica é aplicada à ele, porém quando ocorre um aumento de pressão no interior do tubo, este tenta de certa forma se desenrolar, causando assim o deslocamento da agulha indicadora a qual marca visualmente qual é a pressão exercida naquele momento dentro de um sistema. A Figura 4 pode mostrar mais precisamente como isso ocorre, lembrando que a pressão medida neste dispositivo trata-se da pressão relativa, pois ele foi calibrado previamente ajustando o zero referente ao valor mínimo da escala do manômetro em seu estado de repouso, desta forma tendo uma pressão interna no tubo igual a pressão atmosférica local.

**Figura 4 – Esquemática do manômetro de Bourdon**

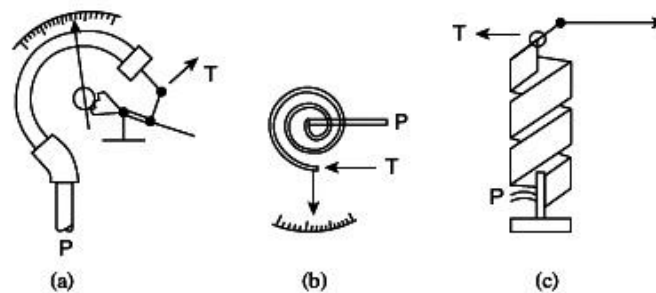


**Fonte: Universidade de Coimbra, 2016**

Sendo assim, a pressão relativa trata-se da pressão manométrica, a qual será abordada neste trabalho.

Os tubos do manômetro podem ter 3 diferentes formas de construção conforme a Figura 5, podendo ser o tubo em C, o tubo em espiral e o tubo em hélice, onde o tubo em hélice é utilizado para pressões mais elevadas quando comparado com os outros dois tipos.

**Figura 5 – Tipos de tubos Bourdon. a) tubo tipo C, b) tubo espiral, c) tubo helicoidal**



**Fonte: Ofícios técnicos – sapiensman, 2016**

O manômetro utilizado no projeto é próximo do encontrado na Figura 6.

**Figura 6 - Manômetro de Bourdon**



**Fonte: WIKA, 2017**

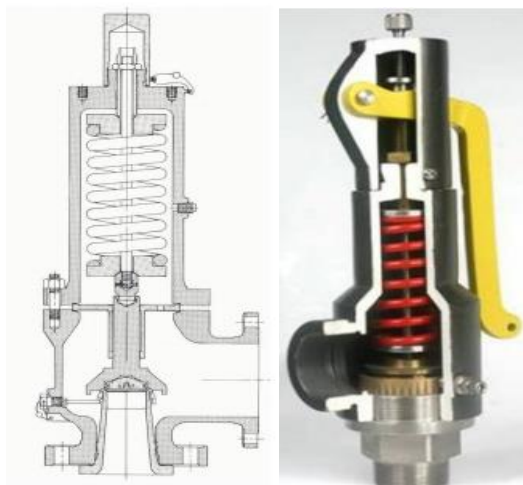
### 3.7.2 Válvula de segurança e alívio de pressão

Segundo Mathias (2008), “a válvula de segurança e alívio é um dispositivo automático de alívio de pressão empregado obrigatoriamente para proteger um vaso de pressão, quando ele opera com gases, vapores, líquidos ou fluidos bifásicos (*flashing*), dependendo da aplicação”.

Quando trata-se de caldeiras a vapor a válvula de segurança e alívio de pressão (Figura 7) é um item obrigatório por ter a principal função de proteção dos equipamentos utilizados e da vida das pessoas que trabalham diretamente com a caldeira ou se encontram próximas ao ambiente de trabalho onde ela está localizada.

Capacidade de vazão, materiais que serão utilizados, posicionamento, quantidade de válvulas, entre outros fatores irão depender especificamente de cada projeto, e por se tratar de um equipamento de extrema importância é necessária uma atenção extra para que ela seja não somente bem dimensionada para os padrões requeridos mas também seja instalada de forma correta, garantindo assim o seu correto funcionamento. Para isso é importante lembrar que o ambiente em que será instalada deve estar limpo e sem umidade e que testes devem ocorrer antes de sua instalação para garantir que ela esteja funcionando de forma adequada.

**Figura 7 – Válvula de Segurança e Alívio de Pressão**



**Fonte: Mathias, 2008**

As válvulas de segurança e alívio de pressão são projetadas de acordo com os requerimentos da Sociedade Norte-americana de Engenheiros Mecânicos (2016), (em inglês American Society of Mechanical Engineers). Como foi citado anteriormente, a válvula de segurança é um item obrigatório por se tratar do equipamento mais importante referente a proteção a ser instalado e uma caldeira ou em um vaso de pressão, isso devido ao objetivo de garantir que a pressão de operação não exceda o valor estabelecido pela PMTA (Pressão

Máxima de Trabalho Admissível), a qual também é calculada e determinada para cada projeto onde é definida pela máxima pressão à temperatura constante no topo de uma caldeira ou vaso de pressão.

### 3.7.3 Isolamento térmico

Segundo Torreira (1980), todos os isolamentos térmicos possuem uma finalidade geral de reduzir as trocas de calor com o ambiente e devido as necessidades técnicas ou econômicas as vezes se torna necessário proteger as tubulações contra perdas de energia na forma de calor, frio, ou por formação de água de condensação.

Com o intuito de obter um melhor aproveitamento energético com menor perda e maior rendimento térmico é necessário isolar tanto a máquina a vapor quanto a tubulação condutora de vapor aumentando dessa forma o desempenho do sistema. Para isso, é necessário saber exatamente o tipo de fluido que está sendo transportado e em qual temperatura irá operar, além também de ter o conhecimento do material da tubulação para que dessa maneira seja possível empregar um isolamento com material adequado que seja capaz de realizar o trabalho.

Os materiais de isolantes térmicos devem ser resistentes às altas temperaturas e apresentar um alto grau de conformação, não somente devido ao aproveitamento energético mas também, e principalmente, devido à segurança dos operadores e às pessoas circundantes.

## 3.8 GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO

Para esta bancada precisa-se de um fornecimento de energia térmica. Seria possível usar uma energia limpa para facilitar a realização deste trabalho. Porém, é mais interessante para a demonstração da bancada utilizar como fonte de energia um gás onde ocorra uma reação química (combustão) de forma a fornecer energia térmica para o sistema.

O gás liquefeito de petróleo é popularmente conhecido como gás de cozinha e geralmente é armazenado em botijões. Estes são originados das

porções mais pesadas do gás natural ou das mais leves do petróleo sendo dessa forma uma mistura gasosa de hidrocarbonetos (Farah, 2012).

Quando está acondicionado dentro de cilindros o GLP está 85% em estado líquido e 15% em estado gasoso para facilitar na sua utilização, sendo que o líquido vai se transformando em gás conforme vai ocorrendo a utilização do mesmo.

Por questões de segurança, é adicionado um composto a base de enxofre no gás para que torne-se perceptível seu cheiro caso ocorra algum vazamento, pois caso isso não fosse feito seria muito difícil ou mesmo impossível notar alguma irregularidade devido ao fato do GLP ser incolor e inodoro quando apresenta baixos teores de enxofre (Petrobrás, 2013).

As propriedades do combustível citado serão apresentadas posteriormente para os devidos cálculos.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo deste trabalho em mente, o foco será projetar um protótipo o qual seja relativamente leve e possua dimensões capazes de demonstrar o seu funcionamento sem problemas de visualização.

A bancada didática contará primeiramente com uma pequena caldeira, onde a água será aquecida com o auxílio de uma chama produzida a partir da queima do GLP que com isso proporcionará uma certa quantidade de energia em forma de vapor para o sistema. Assim será possível transformar energia térmica em energia elétrica com o auxílio de um pequeno dínamo gerador, que estará acoplado à uma pequena turbina que fará o dínamo entrar em movimento através da energia cinética advinda do vapor. A transformação de energia mecânica (turbina) em energia elétrica será representada por pequenos leds que estarão conectados ao dínamo.

O ciclo trabalhará com uma pressão acima da pressão atmosférica, a qual poderá ser evidenciada no manômetro que será instalado junto ao gerador de vapor, onde também se encontrará presente a válvula de alívio de pressão, que será capaz de eliminar para a atmosfera qualquer excesso de pressão que for gerado dentro do sistema.

Juntamente com esses dois equipamentos, outro fator importante para garantir a segurança de quem irá utilizar a bancada é a utilização de isolantes térmicos no gerador de vapor e na tubulação, para não somente haver um melhor rendimento no ciclo, mas também evitar possíveis acidentes como a queima de mãos e braços. Além disso se faz importante a implantação de termômetros que deverão ser instalados na cadeira, na tubulação anterior à turbina e posterior a ela para que se faça possível realizar a leitura da temperatura em diferentes etapas do processo, além de proporcionar maior segurança às pessoas envolvidas no estudo.



## 4.2 GERAÇÃO DE VAPOR

### 4.2.1 Combustível

Como citado anteriormente a fonte de energia se dará através da combustão utilizando GLP para a geração de vapor. Um botijão de gás de 5 kg será utilizado para facilitar seu posicionamento no suporte que será acoplado a própria bancada e desta forma não ocupar tanto espaço físico, o que poderia vir a atrapalhar as pessoas circundantes.

Juntamente com o botijão deverão ser instalados seus equipamentos de controle de gás como a borboleta para rosqueio, o regulador para pressão de gás, a válvula de passagem de gás e a mangueira que se prende aos outros equipamentos através de uma pequena abraçadeira metálica.

Na outra extremidade da mangueira que transporta o gás têm-se o bocal do queimador, que será posicionado logo abaixo da caldeira para que o aquecimento de água ocorra de forma adequada.

### 4.2.2 Abastecimento de água

Devido à sua função didática, a caldeira contará com um abastecimento de água feito através de uma bomba manual que poderá ser acionada tanto por acadêmicos como professores, além de contar com uma válvula de retenção feita em aço inoxidável com tampa aparafusada e extremidades flangeadas que não permita que o líquido retorne para o reservatório, desta forma evitando o refluxo. Tal simplicidade será empregada para que todos os participantes possam observar melhor o funcionamento do processo e assim terem um melhor entendimento do mesmo. Os dois equipamentos são exemplificados na Figura 8:

**Figura 8 – Bomba manual e válvula de retenção**



**Fonte: Isoval, 2017**

Por se tratar de uma bancada didática com um ciclo aberto onde não haverá uma elevação considerável de pressão e temperatura na bomba, não se faz necessário calcular qual é o trabalho realizado por ela.

#### 4.2.3 Caldeira

A caldeira deve ter um projeto tal qual garanta uma boa quantidade de energia transferida para que a eficiência global de geração de vapor seja assegurada.

Os objetivos de uma caldeira são o custo reduzido, ser compacta, acessível, ter tubos com formas simples, boa circulação, elevado coeficiente de transmissão de calor e alta capacidade de produção de vapor (Martinelli, 2017).

##### 4.2.3.1 Materiais

A caldeira que será utilizada para a geração de vapor poderá ser feita em aço inoxidável austenítico por apresentar boas propriedades mecânicas como alta resistência à corrosão e boa soldabilidade. Neste caso, boas opções são o aço AISI 304 ou o aço AISI 304L que apresentam menor teor de carbono em sua composição, sendo dessa forma mais indicados para aplicações de solda. Caso necessite-se de uma maior durabilidade ainda podem ser utilizados os aços AISI 316 e AISI 316L, lembrando que todos eles são utilizados em larga escala na indústria, o que os torna materiais de fácil aquisição.

#### 4.2.3.2 Dimensões

As dimensões da caldeira, a qual terá um formato cilíndrico vertical, serão de diâmetro entre as paredes internas de 150 *mm* e altura de 250 *mm*. O volume de água que será inserido dentro da caldeira para a geração de vapor é calculado através da Equação (4-1).

$$V_{\text{água}} = \pi r^2 \cdot h \quad (4-1)$$

Considerando o centro do marcador de nível de água em 170 *mm* a partir da base do vaso cilíndrico e transformando para *dm*<sup>3</sup>, tem-se:

$$\begin{aligned} V_{\text{água}} &= \pi(r)^2 \cdot h \\ V_{\text{água}} &= 3004,14 \text{ cm}^3 \\ V_{\text{água}} &= 3,004 \text{ dm}^3 = 3,004 \text{ litros} \end{aligned}$$

#### 4.2.3.3 Tipos de vapor

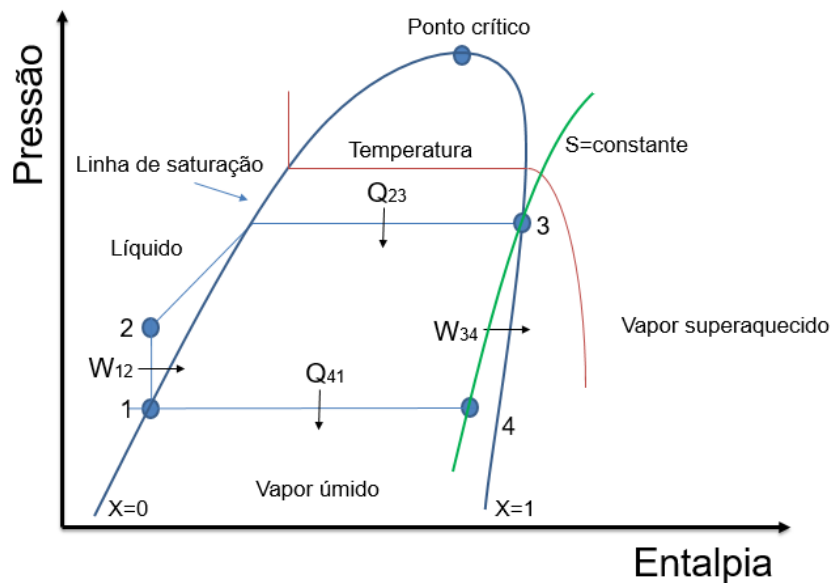
Sabe-se que as propriedades do vapor variam gradativamente e são dependentes diretas da pressão e da temperatura na qual ele está sujeito. Existem dois tipos de vapor: o saturado e o superaquecido. O vapor saturado ocorre onde pressões e temperaturas do vapor e do líquido possam coexistir, ou seja, a taxa de condensação da água é a mesma que a taxa de vaporização.

De acordo com a Spirax Sarco (2017), “o vapor saturado é utilizado em processos de aquecimento, pois, o objetivo é aproveitar a energia térmica do mesmo, já o vapor superaquecido é utilizado para movimentação de máquinas, onde se deseja aproveitar a potência mecânica. Nesse caso, o vapor deve estar totalmente isento de gotículas que podem causar a erosão nas aletas de uma turbina”.

Em contrapartida, como neste projeto não será realizado o aquecimento do vapor acima do ponto de saturação, este não se transformará em vapor superaquecido. Isso se deve ao fato da temperatura e pressão atingirem um baixo patamar sendo suficientes para alcançar o objetivo de mostrar como o ciclo de Rankine funciona na prática, não precisando colocar em cheque a segurança

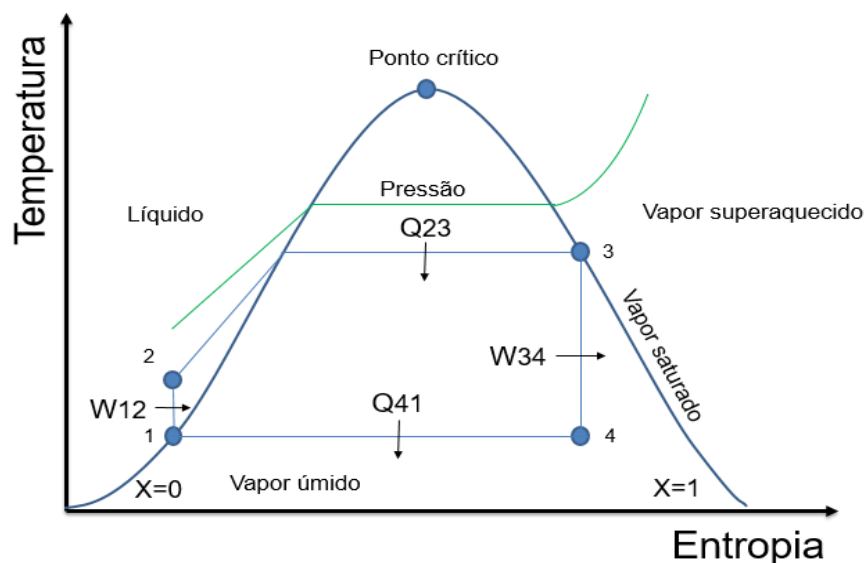
das pessoas. Desta forma, pode-se exemplificar o comportamento do ciclo através do Gráfico 1 que mostra o diagrama de Mollier (Pressão x Entalpia) e do Gráfico 2 que mostra o diagrama de Mollier (Temperatura x Entropia), quais são as fases de transformação da água, lembrando que como falado anteriormente o vapor entrará na turbina na forma de vapor saturado.

**Gráfico 1 – Diagrama de Mollier (Pressão x Entalpia)**



Fonte: Próprio autor, 2017

**Gráfico 2 – Diagrama de Mollier (Temperatura x Entropia)**



Fonte: Próprio autor, 2017

#### 4.2.3.4 Carga térmica

Sabe-se que ao iniciar o aquecimento da água na caldeira é necessário aguardar um período de tempo para que as condições de uso adequadas sejam alcançadas. Após alcançada a temperatura de ebulição da água em determinada pressão se deseja fornecer vapor ao sistema por um determinado tempo para que toda a massa de água seja consumida. Nos cálculos que serão realizados a partir de agora esse tempo admitido será de apenas 15 minutos, mas posteriormente à isso será apresentada uma tabela mostrando os resultados dos mesmos cálculos, utilizando tempos diferentes para futura análise de qual seria a melhor opção para uma determinada atividade em sala. Esse espaço de tempo será utilizado apenas como base de dados para cálculos referentes a carga térmica, porém não será preciso e nem desejável que se esgote a massa total de água da caldeira, para que a elevação da pressão e temperatura, assim como possíveis acidentes, não venham a ocorrer.

Com o volume de água determinado pode-se calcular a carga térmica necessária para que a água líquida possa ser transformada em vapor saturado. A Equação (4-2) mostra que a quantidade de calor por unidade de tempo, ou seja, o fluxo de calor é calculado em função da taxa de geração de vapor da caldeira e da diferença de entalpias entre o vapor saturado e líquido.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot (h_v - h_l) \quad (4-2)$$

Para se obter o valor dessa quantidade de energia primeiramente é necessário saber a taxa de geração de vapor da caldeira. Sabendo que a densidade da água a 25°C é 997,0479 kg/m<sup>3</sup> tem-se:

$$m = V_{\text{água}} \cdot \rho = 3,00 \text{ kg}$$

$$\frac{\dot{m}}{t} = 3,32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 11,98 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

A PMTA (Pressão Máxima de Trabalho Admissível) será estabelecida em 3 bar absoluto (300 kPa), que será a pressão real de trabalho dentro da caldeira.

A partir dessa informação é possível encontrar os valores de entalpia necessários na tabela de água saturada em função da pressão ilustrado na Tabela 1 e a partir dos dados obtidos, encontrar o fluxo de calor liberado pela caldeira.

**Tabela 1 – Tabela com propriedades termodinâmicas da água saturada em função da pressão**

Pressão kPa	Temp. °C	Volume específico (m <sup>3</sup> /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
<i>P</i>	<i>T</i>	<i>v<sub>l</sub></i>	<i>v<sub>v</sub></i>	<i>u<sub>l</sub></i>	<i>u<sub>lv</sub></i>	<i>u<sub>v</sub></i>	<i>h<sub>l</sub></i>	<i>h<sub>lv</sub></i>	<i>h<sub>v</sub></i>	<i>s<sub>l</sub></i>	<i>s<sub>lv</sub></i>	<i>s<sub>v</sub></i>
0,6113	0,01	0,001000	206,132	0	2375,3	2375,3	0,00	2501,30	2501,30	0,0000	9,1562	9,1562
1	6,98	0,001000	129,20802	29,29	2355,69	2384,98	29,29	2484,89	2514,18	0,1059	8,8697	8,9756
1,5	13,03	0,001001	87,98013	54,70	2338,63	2393,32	54,70	2470,59	2525,30	0,1956	8,6322	8,8278
2	17,50	0,001001	67,00385	73,47	2326,02	2399,48	73,47	2460,02	2533,49	0,2607	8,4629	8,7236
2,5	21,08	0,001002	54,25385	88,47	2315,93	2404,40	88,47	2451,56	2540,03	0,3120	8,3311	8,6431
3	24,08	0,001003	45,66502	101,03	2307,48	2408,51	101,03	2444,47	2545,50	0,3545	8,2231	8,5775
4	28,96	0,001004	34,80015	121,44	2293,73	2415,17	121,44	2432,93	2554,37	0,4226	8,0520	8,4746
5	32,88	0,001005	28,19251	137,79	2282,70	2420,49	137,79	2423,66	2561,45	0,4763	7,9187	8,3950
7,5	40,29	0,001008	19,23775	168,76	2261,74	2430,50	168,77	2406,02	2574,79	0,5763	7,6751	8,2514
10	45,81	0,001010	14,67355	191,79	2246,10	2437,89	191,81	2392,82	2584,63	0,6492	7,5010	8,1501
15	53,97	0,001014	10,02218	225,90	2222,83	2448,73	225,91	2373,14	2599,06	0,7548	7,2536	8,0084
20	60,06	0,001017	7,64937	251,35	2205,36	2456,71	251,38	2358,33	2609,70	0,8319	7,0766	7,9085
25	64,97	0,001020	6,20424	271,88	2191,21	2463,08	271,90	2346,29	2618,19	0,8930	6,9383	7,8313
30	69,10	0,001022	5,22918	289,18	2179,22	2468,40	289,21	2336,07	2625,28	0,9439	6,8247	7,7686
40	75,87	0,001026	3,99345	317,51	2159,49	2477,00	317,55	2319,19	2636,74	1,0258	6,6441	7,6700
50	81,33	0,001030	3,24034	340,42	2143,43	2483,85	340,47	2305,40	2645,87	1,0910	6,5029	7,5939
75	91,77	0,001037	2,21711	394,29	2112,39	2496,67	384,36	2278,59	2662,96	1,2129	6,2434	7,4563
100	99,62	0,001043	1,69400	417,33	2088,72	2506,06	417,44	2258,02	2675,46	1,3025	6,0568	7,3593
125	105,99	0,001048	1,37490	444,16	2069,32	2513,48	444,30	2241,05	2685,35	1,3739	5,9104	7,2843
150	111,37	0,001053	1,15933	466,92	2052,72	2519,64	467,08	2226,46	2693,54	1,4335	5,7897	7,2232
175	116,06	0,001057	1,00363	486,78	2038,12	2524,90	486,97	2213,57	2700,53	1,4848	5,6868	7,1717
200	120,23	0,001061	0,88573	504,47	2025,02	2529,49	504,68	2201,96	2706,63	1,5300	5,5970	7,1271
225	124,00	0,001064	0,79325	520,45	2013,10	2533,56	520,69	2191,35	2712,04	1,5705	5,5173	7,0878
250	127,43	0,001067	0,71871	535,08	2002,14	2537,21	535,34	2181,55	2716,89	1,6072	5,4455	7,0526
275	130,60	0,001070	0,65731	548,57	1991,95	2540,53	548,87	2172,42	2721,29	1,6407	5,3801	7,0208
300	133,55	0,001073	0,60582	561,13	1982,43	2543,55	561,45	2163,85	2725,30	1,6717	5,3201	6,9918

Fonte: Wylen et al., 1995

Desta forma, aplicando-se na fórmula:

$$\dot{Q}_C = \dot{m} \cdot (h_v - h_l) = 7,68 \text{ kW}$$

A partir desta quantidade de energia calcula-se a vazão mássica necessária de combustível. A Equação (4-3) mostra que a mesma quantidade de energia é resultado da multiplicação entre a vazão mássica de combustível e o PCI (Poder Calorífico Inferior) do combustível.

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_{GLP} \cdot PCI_{GLP} \quad (4-3)$$

Onde o PCI do GLP é igual a 11100 *kcal/kg* ou 46442,4 *kJ/kg*. Tem-se:

$$\dot{m}_{GLP} = 1,65 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{s} = 0,59 \frac{kg}{h}$$

Tendo em mente que para este valor não foi levado em conta as possíveis perdas de combustão e que a partir dele é necessário ter o conhecimento se o equipamento selecionado para fazer a queima do combustível conseguirá disponibilizar a quantidade de massa de combustível necessária. Como, neste caso, deseja-se transformar toda a massa de água no estado líquido em estado de vapor em apenas 15 minutos, serão necessários aproximadamente 150 gramas de combustível. Para isso se faz necessário a utilização de um bocal de fogão industrial, pois um bocal de fogão convencional não seria capaz de liberar tamanho consumo.

Para se ter o conhecimento da vazão volumétrica nos estados de líquido e de vapor da caldeira é necessário retirar da Tabela 1 os valores de volume específico para a água nos dois estados na pressão pré-estabelecida. Seus valores são:  $v_l = 0,001073 \frac{m^3}{kg}$  e  $v_v = 0,60582 \frac{m^3}{kg}$ . Desta forma é possível calcular a vazão volumétrica através da Equação (4-4):

$$\dot{V} = v \cdot \dot{m} \quad (4-4)$$

Assim sendo, tem-se o valor da vazão volumétrica no estado líquido:

$$\dot{V} = 3,57 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{V} = 0,01285 \frac{m^3}{h}$$

E a vazão volumétrica no estado gasoso:

$$\dot{V} = 0,0020 \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{V} = 7,2580 \frac{m^3}{h}$$

É possível observar que à pressão de 2 bar manométrico (3 bar absoluto) a água terá uma vazão volumétrica cerca de 564 vezes maior no estado de vapor do que no estado líquido. Isso vem comprovar que a medida de desordem das partículas de água neste sistema terá um aumento, ou seja, haverá um aumento de entropia.

Através da variação da temperatura da água em temperatura ambiente e após chegar no seu ponto de saturação, juntamente com a quantidade de calor a qual é transferida para o sistema, pode-se calcular qual será a carga térmica da caldeira. A quantidade de calor é calculada pela Equação (4-5):

$$Q = m.(\Delta h) \quad (4-5)$$

Onde  $\Delta h$  é a variação de entalpia entre a água à 25°C e 133,55°C. Tem-se:

$$Q = 7860,03 \text{ kJ} \text{ ou } Q = 1878,59 \text{ kCal}$$

A carga térmica pode ser então calculada a partir da Equação (4-6):

$$C = \frac{Q}{\Delta t} \quad (4-6)$$

$$C = 2.08 \frac{\text{kCal}}{s}$$



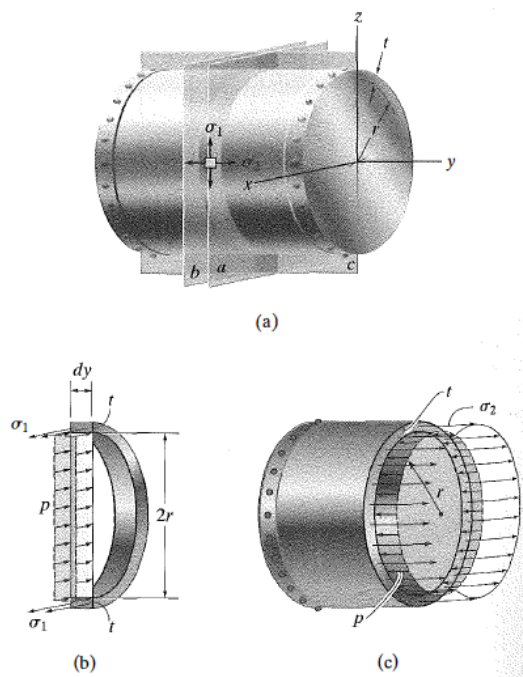
#### 4.2.3.5 Espessura de parede

Por se tratar de uma caldeira com características de vasos de pressão de paredes finas e sabendo que nessas condições o material utilizado em sua fabricação é submetido a cargas em todas as direções, deve-se primeiramente provar que a variação da distribuição de tensão será uniforme por toda a parede de contato. Para tal Hibbeler (2006), diz que “paredes finas” refere-se a um vaso para o qual a relação raio interno-espessura da parede tem valor igual ou superior a 10 ( $r/t \geq 10$ ).

Referente aos vasos cilíndricos, a pressão manométrica contida no interior do vaso é uniforme e este é submetido a tensões normais  $\sigma_1$  na direção circunferencial ou tangencial e  $\sigma_2$  no sentido longitudinal ou axial. Esses dois componentes da tensão exercem tração sobre o material e é possível determinar o valor delas em termos da geometria do vaso e de sua pressão interna (Hibbeler, 2006).

Utilizando o método das seções e aplicando as equações de equilíbrio de força, obtém-se as equações das tensões normais a partir do diagrama de corpo livre representado na Figura 9.

**Figura 9 – (a) Vaso cilíndrico com parede de espessura  $t$  e raio interno  $r$ , (b) vaso seccionado pelos planos a, b e c, (c) porção esquerda da seção b.**



Fonte: Hibbeler, 2006

$$\Sigma F_x = 0; \quad 2[\sigma_1(t dy)] - p(2r dy) = 0$$

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t} \quad (4-7)$$

$$\Sigma F_y = 0; \quad \sigma_2(2\pi rt) - p(\pi r^2) = 0$$

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2t} \quad (4-8)$$

Nessas equações,

$\sigma_1, \sigma_2$  = tensão normal nas direções circunferencial e longitudinal, respectivamente. Considerando que cada uma delas é constante em toda a parede do cilindro e que cada uma submete o material à tração.

$p$  = pressão manométrica interna desenvolvida pelo gás ou fluido.

$r$  = raio interno do cilindro.

$t$  = espessura da parede ( $r/t \geq 10$ ).

Para o cálculo da espessura de parede pode-se considerar como tensão normal a tensão de escoamento do material, lembrando que quando for utilizado um material diferente, esse valor modifica da mesma forma.

Analisando a tabela de propriedades mecânicas médias de materiais típicos de engenharia em unidades do Sistema Internacional (Hibbeler, 2006), pode-se utilizar uma liga de aço inoxidável 304, o qual possui uma tensão de escoamento em tração de 207 MPa.

Para o cálculo será utilizada a Equação (4-7), que se refere a tensão no sentido circunferencial do vaso devido ao resultado final que será o dobro da tensão longitudinal.

$$p = 0,2 \text{ MPa (Manométrica)}$$

$$r = 75 \text{ mm}$$

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t} = 0,072 \text{ mm}$$

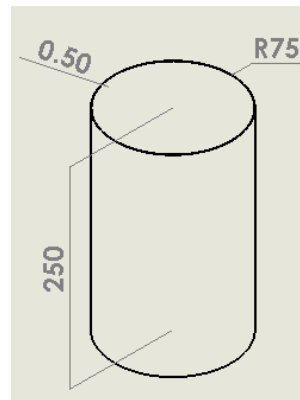
Usualmente é aplicável para caldeiras um valor de Coeficiente de Segurança igual a 5, desta forma tem-se:

$$t.5 = 0,362 \text{ mm}$$

$$\frac{r}{t} = 207 > 10$$

Portanto, pode ser adotado com total segurança vaso cilíndrico com espessura de parede de 0,5 milímetros, a qual se trata de uma espessura comercial. As dimensões da caldeira estão representadas na Figura 10.

**Figura 10 – Dimensões da caldeira**



**Fonte: Próprio autor, 2017**

#### 4.2.3.6 Dispositivos de controle

Alguns dispositivos presentes em uma caldeira são indispensáveis mesmo em pequenas proporções e com objetivos didáticos. Para o controle da pressão interna será utilizado um manômetro com tudo Bourdon para meios líquidos e gasosos com uma caixa de aço inoxidável que seja capaz de trabalhar em uma faixa de pressão entre 0 e 4 bar como mostrado na Figura 6. É importante lembrar que o manômetro deve ser montado junto a um sifão, para que o vapor não cause nenhum dano ao equipamento.

Juntamente ao manômetro também se faz necessário o uso de uma válvula de segurança e alívio de pressão, a qual permite a liberação de vapor a uma pressão de 2,5 bar manométrico e que possua bocal integral fabricado em aço inoxidável para não permitir o contato do fluido de processo com o corpo da válvula enquanto ela estiver fechada. Desta forma tem-se uma maior durabilidade deste equipamento.

Para a leitura da temperatura em que se encontra o processo, deverá ser instalado junto a caldeira um termômetro bimetálico (Figura 11), que apresenta lâminas em seu interior de materiais diferentes (latão, ferro ou cobre) que trabalham em função da diferença de coeficiente de dilatação entre eles. O corpo desse equipamento é fabricado em aço carbono e apresenta uma boa resistência além de apresentar um alto custo-benefício.

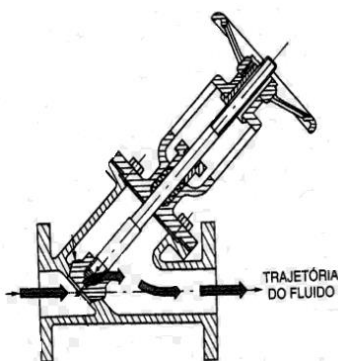
**Figura 11 – Termômetro industrial bimetálico**



**Fonte: Acepil, 2017**

No topo da caldeira deverá ser posicionada uma válvula globo (Figura 12), a qual trata-se de uma válvula de regulagem que, segundo Martinelli (2017), “As válvulas de globo podem trabalhar não apenas em posição aberta e fechada, mas em qualquer posição intermediária de fechamento”. Neste caso é recomendável que ela seja do tipo y por possuir menor perda de carga. Com relação ao seu diâmetro nominal, ele deve ser o mesmo que o da tubulação por onde o fluxo de vapor seguirá após a saída da caldeira, além de sua operação ser realizada por meio de volante ou alavanca, conforme necessário.

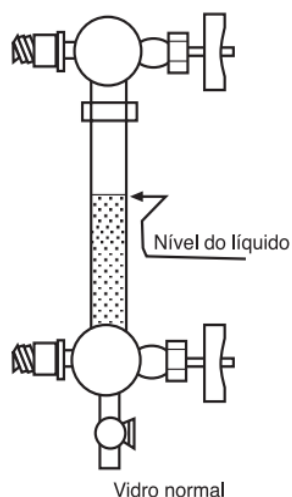
**Figura 12 – Válvula Globo em y com operação por meio de volante**



**Fonte: Portesborges, 2017**

Para o controle do volume de água deverá constar junto ao trocador de calor cilíndrico, conforme a Figura 13, um visor tubular que será utilizado para avaliar o nível de água que se encontra dentro da caldeira. Este deverá ter seu centro em uma altura de 170 *mm* da base da caldeira.

**Figura 13 – Visor tubular**



**Fonte: Nogueira, Rocha e Nogueira, 2005**

Para finalizar, a caldeira deverá ter uma válvula esfera que trabalha somente nas posições aberta e fechada com a função de drenar a água residual que ficar presente dentro da caldeira ao fim de seu uso. Ela deverá ser montada na saída de fundo da caldeira e deverá ser fixada com rosca. A válvula é exemplificada na Figura 14:

**Figura 14 – Válvula esfera**



**Fonte: Genebre, 2017**

### 4.3 DISTRIBUIÇÃO

Segundo Martinelli (2017), “o sistema de distribuição de vapor é, sem dúvida, o mais importante elo de ligação entre o produtor (caldeira) e o consumidor de vapor”. Isso se torna verdade pois sabe-se que o vapor produzido em uma caldeira deverá ser entregue em pontos distantes dela para o consumo final, e este processo ocorre por meio de linhas de vapor.

Sabe-se que em um projeto de tubulações de vapor existem aspectos importantes para seu dimensionamento. Nogueira, Rocha e Nogueira (2005) e Martinelli (2017) dizem quais cargas devem ser consideradas:

- Pressão interna e externa;
- Peso próprio da linha, peso do fluido;
- Peso localizado (acessório, peso resultante de outras linhas);
- Ações dinâmicas internas (golpes de aríete, impactos, vibrações) e externas (ação do vento, da interação com máquinas de processo);
- Esforços decorrentes de tensões térmicas (flexibilidade);
- Capacidade de permitir o escoamento do vapor com perda de carga e velocidade aceitáveis.

Para tal, é necessário garantir também a segurança das pessoas que estarão próximas à tubulação atribuindo valores adequados para o processo e especificando bem os materiais que serão utilizados.

Existem dois métodos básicos para o dimensionamento de tubulações a vapor: o método da velocidade e o método da perda de carga. Por se tratar de uma bancada didática com pequenas dimensões será utilizado o método da velocidade por não prever o comprimento da tubulação e podendo ser utilizado em ramais individuais.

A fórmula utilizada para o cálculo do diâmetro do tubo é a seguinte:

$$\dot{V} = vel. \frac{\pi D^2}{4} \quad (4-9)$$

A velocidade de 15 m/s é a mais conveniente devido às pequenas perdas de carga causadas e pelo projeto ter uma pressão baixa. Obtém-se o valor do volume específico do vapor na Tabela 1 e com isso tem-se:

$$D = 13 \text{ mm}$$

$$D = 0,51''$$

Tendo em vista este resultado, sabe-se que uma tubulação com um diâmetro de 1/2" é o suficiente. Para tal será utilizado um tubo em aço inoxidável schedule 40, o qual é ideal para condução de fluidos não corrosivos.

Desta forma, na tabela 2 estão descritas as dimensões do tubo, que pode ser encontrado no comércio, oferecido por diferentes fabricantes.

**Tabela 2 – Dimensões tubo SCH 40**

Schedule 40			
Diâmetro		Espessura mm	Peso teórico kg/m
pol	mm		
1/2"	21,30	2,77	1,26
3/4"	26,70	2,87	1,68
1"	33,40	3,38	2,50
1.1/4"	42,20	3,56	3,38
1.1/2"	48,30	3,68	4,05
2"	60,30	3,91	5,43
2.1/2"	73,00	5,16	8,62
3"	88,90	5,49	11,28
3.1/2"	101,60	5,74	13,56
4"	114,30	6,02	16,06
5"	141,30	6,55	21,75
6"	168,30	7,11	28,23
8"	219,10	8,18	42,48
10"	273,05	9,27	60,23
12"	323,84	10,31	79,64

Fonte: Aços continente, 2017

Tendo em vista o tamanho exato de tubulação que irá ser utilizado, é possível saber a real velocidade que o vapor irá percorrer pelo sistema. Isso se dá através do cálculo a partir da Equação (4-9) utilizando o novo diâmetro entre as paredes internas do tubo de 1/2" que é igual a 15,76 mm.

Desta forma:

$$vel = 10,33 \text{ m/s}$$

#### 4.3.1 Quantidade de condensado

No processo de aquecimento da tubulação é formada uma certa quantidade de condensado, sendo esse instante o mais favorável para a sua formação. Este fato ocorre principalmente nos primeiros cinco minutos de aquecimento da tubulação, e para calcular a quantidade de condensado que será formado utiliza-se a Equação (4-10):

$$Q = c \cdot \frac{m \cdot (t_f - t_i)}{x \cdot L} \quad (4-10)$$

Sendo:

$Q$  – a quantidade de condensado formado (kg)

$c$  – calor específico do aço inoxidável ( $C=0,477 \text{ kJ/kg.k}$ )

$m$  – o peso da tubulação de vapor, de aço, no trecho onde se considera formando o condensado (kg)

$t_i$  – a temperatura da tubulação de vapor, suposta igual à do meio ambiente (K)

$t_f$  – a temperatura final do vapor, que será igual à do vapor (K)

$L$  – calor latente do vapor (kJ/kg)

$x$  – título do vapor ao entrar na tubulação (normalmente  $x=1$ )

O peso teórico da tubulação é retirado da Tabela 2 cujo valor é de 1,26 (kg/m), desta forma:

Massa da tubulação:  $P = 0,5 \text{ (m)} \cdot 1,26 \text{ (kg/m)} = 0,63 \text{ (kg)}$

Temperaturas: Inicial da tubulação  $t_i = 25^\circ\text{C}$



De acordo com a Tabela 1, a temperatura do vapor é de aproximadamente 133,55°C.

O calor latente do vapor é retirado da Tabela 1, na coluna Entalpia Evap. ( $h_{lg} = 2163,85 \text{ kJ/kg}$ ).

Assumindo o vapor no estado saturado,  $x = 1$ .

Desta forma, a quantidade de condensado formado durante o aquecimento é:

$$Q = 3,04 \cdot 10^{-3} \text{ kg/min}$$

$$Q = 0,1824 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Sendo que em 15 minutos se forma 0,045 kg de condensado.

O condensado formado na tubulação pode vir a prejudicar a turbina quando o vapor alcançar esse estágio do ciclo devido ao fato do vapor estar úmido e não seco. Porém, a quantidade de condensado formado é muito pequena e se torna relevante não incluir uma tubulação de retorno de condensado neste projeto, pois ele não irá prejudicar de forma significativa o funcionamento do equipamento, além de tornar a visualização e entendimento do ciclo de Rankine mais fácil.

Nesta tubulação que se encontra entre o gerador de vapor e a turbina, se torna interessante a instalação de um termômetro para a leitura da temperatura neste estágio do ciclo.

#### 4.4 ISOLANTE TÉRMICO

Isolantes térmicos podem ser usados por motivos econômicos ou por proteção pessoal. Levando em consideração os objetivos didáticos da bancada, o isolante térmico utilizado na caldeira, assim como na tubulação, não se fará presente devido a função da perda de calor e sim em função da segurança das pessoas que farão o uso do equipamento. Desta forma, as perdas de calor através de vazamentos ou por radiação após o isolamento serão desprezíveis.

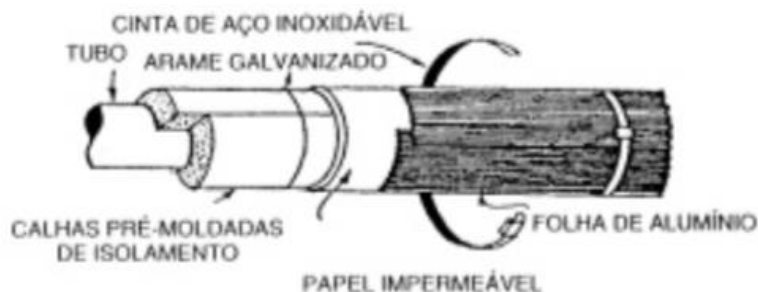
Em se tratando de proteção pessoal, Telles (1987) diz que o isolamento térmico deve ser aplicado em todas as tubulações com temperatura acima de 60°C, nas quais seja razoável supor a possibilidade de contato de pessoas. Desta forma, mostra-se que o isolante térmico tem o objetivo de evitar possíveis queimaduras nas pessoas que possam vir a encostar na tubulação ou mesmo inibir o desconforto causado pela excessiva irradiação de calor (Telles, 1987).

Tendo em vista a temperatura máxima desejada na parte externa da tubulação (60°C) e sabendo que a localização da tubulação, a temperatura do ambiente, a velocidade do vento e a umidade do ar são fatores que influenciam muito na eficiência de um isolamento térmico, os cálculos para a espessura deste podem não resultar em valores fidedignos para a aplicação que se deseja. Por isso será determinado um valor mínimo de espessura de isolamento térmico para proteção pessoal que segundo Telles (1987) é de 25 mm.

O material que o isolante térmico será constituído é a lã de vidro, material esse que suporta uma temperatura de até 400°C, tem boa resistência à umidade, ao fogo e a danos mecânicos. O isolamento será aplicado em formas de calhas, as quais serão envolvidas por um invólucro impermeável de papelão betuminoso e depois uma proteção de chapas de alumínio corrugado para evitar o contato direto das pessoas com o material isolante, além de protegê-lo da umidade. O papelão é utilizado para evitar o contato direto do isolante (material alcalino) com as chapas de alumínio, não permitindo que este venha a sofrer corrosão.

A ilustração do isolamento térmico desejado é mostrada na Figura 15:

**Figura 15 – Isolamento térmico externo**



**Fonte: Telles, 1987**

As chapas de proteção devem ter um recobrimento mínimo entre si de 50 mm, para evitar a entrada de água, as quais deverão ser presas por cintas de aço inoxidável conforme ilustra a imagem anterior.

#### 4.5 USO FINAL

O objetivo da utilização do vapor gerado na caldeira é ao final do ciclo transformar a energia térmica contida no sistema em energia elétrica. Para isso é necessário o auxílio de uma turbina a vapor, a qual é capaz de transformar essa energia contida no fluxo contínuo de vapor em energia mecânica.

Uma explicação sucinta sobre turbinas é feita por Martinelli (2017):

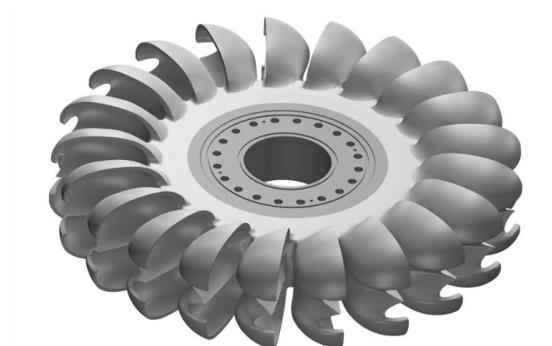
A turbina é um motor rotativo que converte em energia mecânica a energia de uma corrente de água, vapor d'água ou gás. O elemento básico da turbina é a roda ou rotor, que conta com paletas, hélices, lâminas ou cubos colocados ao redor de sua circunferência, de forma que o fluido em movimento produza uma força tangencial que impulsiona a roda, fazendo-a girar. Essa energia mecânica é transferida através de um eixo para movimentar uma máquina, um compressor, um gerador elétrico ou uma hélice. As turbinas se classificam como hidráulicas ou de água, a vapor ou de combustão. Atualmente, a maior parte da energia elétrica mundial é produzida com o uso de geradores movidos a turbinas.

A turbina que poderá ser utilizada neste projeto é a turbina do tipo Pelton. Trata-se de uma turbina de ação onde o fluxo de água incide sob forma de jato sobre o rotor que possui pás em forma de duas conchas (Silva, 2017).

A turbina Pelton (Figura 16) trata-se de uma turbina hidráulica, porém, por se tratar de um equipamento de fácil aquisição e baixo custo, torna-se interessante empregá-lo neste trabalho mesmo que o fluido que percorrerá por ele esteja na forma de vapor. Para isso, a turbina deverá estar bem isolada para não haver perdas de calor para a vizinhança assumindo um regime permanente. Com essa ideia em vista, pode-se utilizar o mesmo material empregado na caldeira para se fabricar uma caixa protetora que envolverá a turbina para que

ocorra o total aproveitamento da energia disponibilizada pelo vapor, não esquecendo de aplicar isolante térmico por questões de segurança e rendimento.

**Figura 16 – Turbina Pelton**



**Fonte: Voith, 2017**

A partir dos dados termodinâmicos de entrada da turbina previamente estabelecidos é possível calcular os parâmetros de saída da mesma. Isso se faz encontrando a entalpia de saída da turbina através da Equação (4-11) estabelecendo a potência em 15 W, que é considerada um valor suficiente para acender as lâmpadas de led.

$$\dot{W} = \dot{m} \cdot (h_e - h_s) \quad (4-11)$$

Onde:

$h_e$  – entalpia de entrada

$h_s$  – entalpia de saída

$$h_s = 2720,79 \frac{kJ}{kg}$$

Contudo, existe a possibilidade de parte do vapor saturado se transformar em líquido durante o trabalho realizado pela turbina. Para verificar se isso ocorre é necessário calcular o título da mistura líquido-vapor, o qual representa a porcentagem de massa de vapor nesta mistura. Admitindo que após a turbina, o sistema cairá para a pressão atmosférica (1 bar absoluto) e utilizando a Tabela 1 é possível calcular o título utilizando a Equação (4-12):

$$X = \frac{h_v - h_l}{h_s - h_l} \quad (4-12)$$

Onde:

$$h_l = 417,44 \text{ kJ/kg}$$

$$h_v = 2675,46 \text{ kJ/kg}$$

Desta forma, tem-se:

$$X = 0,98$$

Para a geração de energia elétrica a partir do trabalho mecânico realizado na turbina poderá ser utilizado, como mostrado na Figura 17, um dínamo gerador (dínamo de bicicleta). Ele deverá estar interligado a pequenas luzes de led para que a demonstração de transformação de energia seja passível de visualização.

**Figura 17 – Cubo Dínamo**



**Fonte: Shimano, 2017**

Admitindo aqui que existe uma eficiência de 90% de transferência de energia da turbina para o gerador elétrico, a potência que chegará até ele será de 13,5 W.

Em virtude de um melhor acompanhamento do processo, mais um termômetro e um manômetro com alcance (Figura 18) de apenas 1 bar poderão ser instalados na tubulação que sai da turbina e se encaminha para o

condensador. Desta forma será possível acompanhar e entender melhor a queda de temperatura e pressão causada pelo trabalho realizado na turbina.

**Figura 18 – Manômetro de curto alcance**



**Fonte: Ilmanometro, 2017**

Como visto, a pressão, a entalpia e a temperatura do vapor diminuem ao passar pela turbina. Por outro lado o volume específico aumenta e juntamente à ele a velocidade. Desta forma, encontrando o volume específico do vapor à pressão de 1 bar absoluto na Tabela 1 e utilizando a Equação (4-4) para descobrir a nova vazão volumétrica, encontra-se a velocidade de escoamento após a turbina, a partir da Equação (4-9):

Desta forma:

$$\dot{V} = 0,0056 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Vel_2 = 28,89 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

#### 4.6 RECUPERAÇÃO

Com o intuito de retirar energia do sistema em forma de calor, um condensador deverá ser instalado próximo a saída da turbina para que o vapor

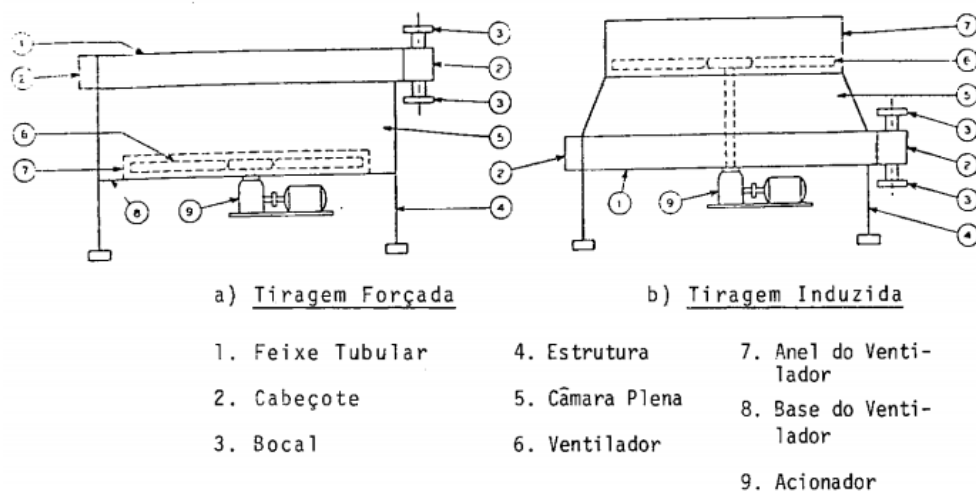
troque calor com outro fluido e possa dessa forma vir a condensar, ou seja, perder calor latente da mudança de fase, vindo a retornar para o estado líquido de forma total ou parcial.

Para se obter um trocador de calor que seja ao mesmo tempo eficiente e com baixos custos de fabricação, montagem, operação e manutenção, é necessário ter o conhecimento de alguns aspectos importantes e relevantes como transferência de calor, dimensionamento, perda de carga e desempenho.

Apesar de existirem uma série de diferentes classificações de trocadores de calor, no presente projeto será utilizado um trocador de calor resfriado a ar devido a não necessidade de utilização da água e seus equipamentos de instalação e uso.

Segundo Silva (1980), "o trocador de calor resfriado a ar é constituído de um feixe tubular, usualmente aletado, por onde circula o fluido de processo. A circulação do ar que se dá externamente ao feixe, poderá ser conseguida por meio de tiragem natural ou por ventiladores (tiragem induzida e forçada)". Na Figura 19 são mostrados os componentes típicos do equipamento.

**Figura 19 – Componentes típicos de um trocador de calor resfriado a ar**



**Fonte: Silva, 1980**

Por ter a vantagem de movimentar ar frio e consumir menos potência, é preferível utilizar o método de circulação por tiragem forçada que além disso possui uma facilidade maior de acesso ao ventilador e ao sistema de acionamento, desta forma privilegiando a manutenção do equipamento.

O modelo de condensador utilizado para refrigeração poderá ser muito bem empregado neste projeto, pois ele possui tubos de cobre que tem boa resistência à corrosão. Além disso, como mostrado na Figura 20, ele já vem com um ventilador aderido diretamente à coifa, neste caso facilitando a instalação e a utilização do equipamento.

**Figura 20 – Condensador compacto de refrigeração a ar**



**Fonte: Refrigeration device, 2017**

Não tendo em mente calcular o custo total de instalação deste equipamento e desprezando perdas de carga devido ao atrito ou mesmo nos bocais e retornos, deverá ser calculada a quantidade de calor que será retirada do sistema com o objetivo de entender como as propriedades termodinâmicas irão se comportar ao final deste ciclo.

Por se tratar de um trocador de calor e ter função semelhante a caldeira, pode-se utilizar a Equação (4-2) para calcular o fluxo de calor que haverá no condensador, lembrando que os valores de entalpia são:

$$h_1 = 417,33 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_4 = 2722,76 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q}_c = 7,66 \text{ kW}$$



Após o trabalho realizado no trocador de calor é importante que ao final do ciclo esteja presente um pequeno reservatório de água que possibilite a visualização da transformação da água do estado de vapor em estado líquido.

O reservatório deverá ser fabricado em um material que possibilite que as pessoas observem a quantidade de água que estará sendo acumulada para haver um melhor entendimento das etapas do ciclo de Rankine.

#### 4.7 EFICIÊNCIA TÉRMICA

A eficiência térmica do ciclo de Rankine mede o percentual da quantidade de energia fornecida ao fluido de trabalho que é convertida em trabalho líquido disponível. Existe mais de uma forma de calcular a eficiência térmica do ciclo, mas a que será utilizada aqui é representada pela Equação (4-13).

Onde:

$\dot{W}_t$  – Potência na turbina

$\dot{W}_b$  – Potência na bomba

$\dot{Q}_c$  – Fluxo de calor na caldeira

$$\eta = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_b}{\dot{Q}_c} \cdot 100 \quad (4-13)$$

Contudo, por se tratar de um ciclo aberto pode ser considerado valor nulo para a potência gerada na bomba, já que esta é apenas uma manivela manual a qual não interfere na eficiência do ciclo. Desta forma tem-se:

$$\eta = 0,19 \%$$

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da proposta inicial da criação de um projeto onde um protótipo de bancada didática pudesse ser construído, várias ideias foram surgindo no decorrer do caminho de como seria a melhor forma de fazer essa tarefa. Pesquisas referentes ao tema foram efetuadas com o intuito de saber quais parâmetros iniciais poderiam ser adotados para que as transformações termodinâmicas estivessem o mais próximo possível da realidade.

Os cálculos foram realizados com o objetivo de acadêmicos e professores conseguirem proceder seus estudos em um curto espaço de tempo, onde, por exemplo, em apenas alguns minutos de uma aula, o material pudesse ser utilizado e considerações posteriores referentes ao que foi visto pudessem ser realizadas para uma melhor compreensão do funcionamento do ciclo e do funcionamento dos equipamentos.

Haja visto que possam existir diferentes ocasiões as quais a bancada possa vir a ser utilizada, a Tabela 3 mostra a variação de todos os parâmetros e propriedades termodinâmicas calculados acima, em diferentes períodos de tempo, do consumo da massa de água no interior da caldeira. Desta forma, as pessoas que forem utilizar a bancada didática poderão escolher qual é a melhor opção de utilização.

Tabela 3 – Variação dos cálculos apresentados em diferentes escalas de tempo

Parâmetros	Tempo (s)			
	900	1800	2700	3600
Vazão mássica (kg/s)	0.003327924	0.001664	0.001109	0.000832
Fluxo de calor na caldeira (kW)	7.68038343	3.840192	2.560128	1.920096
Vazão mássica de combustível (kg/S)	0.000165374	8.27E-05	5.51E-05	4.13E-05
Vazão mássica de combustível (kg/h)	0.595347793	0.297674	0.198449	0.148837
Consumo de combustível - kg/tempo	0.148836948	0.148837	0.148837	0.148837
Vazão volumétrica líquido (m <sup>3</sup> /s)	3.57086E-06	1.79E-06	1.19E-06	8.93E-07
Vazão volumétrica vapor (m <sup>3</sup> /s)	0.002016123	0.001008	0.000672	0.000504
Expansão volumétrica (vezes maior)	564.6039143	564.6039	564.6039	564.6039
Velocidade de escoamento pela tubulação (m/s)	10.33540619	5.167703	3.445135	2.583852
Entalpia saída turbina (kJ/kg)	2720.792686	2716.285	2711.778	2707.271
Vazão volumétrica após turbina (m <sup>3</sup> /s)	0.005637504	0.002819	0.001879	0.001409
Diâmetro interno tubo (m)	0.01576	0.01576	0.01576	0.01576
Velocidade de escoamento após turbina (m/s)	28.89996714	14.44998	9.633322	7.224992
Fluxo de calor no condensador (kW)	7.66538343	3.825192	2.545128	1.905096
Quantidade de condensado (kg)	0.045608748	0.091217	0.136826	0.182435
Eficiência térmica (%)	0.195302749	0.390605	0.585908	0.781211

Fonte: Próprio autor, 2017

Todos os cálculos realizados anteriormente se referem ao tempo de consumo total da massa de água em apenas 15 minutos (900 segundos). Isso resulta em velocidades de escoamento pela tubulação maiores, além de maiores vazões volumétricas, menor produção de quantidade de condensado e fluxo de calor nos trocadores de calor mais elevados. Porém, nessa quantidade de tempo o sistema terá uma eficiência térmica menor e será necessário um maior consumo de combustível para que o fluxo de calor desejado seja alcançado, não esquecendo que o condensador terá de realizar um trabalho maior para retirar do sistema todo o calor desejado. Desta forma, a quantidade de combustível liberada para o sistema pode ser controlada para que se alcance os objetivos desejados.

## 6 CONCLUSÕES

Ao propor o tema do projeto da bancada didática de máquina a vapor foi constatado que seria possível envolver materiais de baixo custo e que estivessem presentes no mercado. Os resultados obtidos a partir dos valores pré-estabelecidos apresentam semelhança com a realidade já que pequenas proporções foram adotadas. A baixa eficiência do equipamento é reflexo da baixa potência gerada na turbina, porém suficiente para cumprir o objetivo de transformar trabalho em energia elétrica.

Conforme mostrado na Tabela 3, nota-se que existe a possibilidade de utilizar a bancada de diferentes maneiras dependendo da necessidade dos usuários. A variação da taxa de fornecimento de combustível é proposta e torna-se importante pelo fato de auxiliar no entendimento de funcionamento da bancada e de como as propriedades termodinâmicas se comportam no decorrer do ciclo, proporcionando as transformações e a geração de trabalho.

Para que haja um completo entendimento do comportamento do fluido e dos equipamentos presentes é necessário o estudo paralelo do comportamento dos materiais, que deverão ser selecionados de acordo com a sua utilização para proporcionar um melhor aproveitamento do vapor gerado na caldeira.

Como sugestão para a sequência deste trabalho está a construção propriamente dita do protótipo da bancada didática, levando em conta que modificações referentes à pressão de trabalho e potência requerida na turbina podem ser feitas caso a mudança necessária nos equipamentos seja realizada de modo a priorizar a segurança dos usuários. Contudo, é necessário que a bancada atenda às necessidades dos usuários para que sua utilização possa ser efetiva no auxílio de estudos referentes aos ciclos de vapor.

## REFERÊNCIAS

- ACC PR ENGENHARIA DE MEDIÇÃO. **Artigos**. Disponível em: <<http://www.accpr.com.br/calibracao-de-manometros-vacuometros-e-manovacuumetros-analogicos-e-a-classe-de-exatidao/>>. Acesso em: 20 out. 2016.
- ACEPIL. **Termômetros industriais**. Disponível em: <<http://www.acepil.com.br/artigos/termometros-industriais>>. Acesso em: 02 out. 2017.
- AÇOS CONTINENTE. **Tubo SCH 40 e 80 - NBR5590**. Disponível em: <<http://www.acoscontinente.com.br/secao/33/tubo-sch-40-e-80---nbr-5590>>. Acesso em: 12 out. 2017.
- ALFA LAVAL AALBORG. **Poder calorífico inferior**. Disponível em: <<http://www.aalborg-industries.com.br/downloads/poder-calorifico-inf.pdf>>. Acesso em: 27 set. 2016.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/> Acesso em: 22 nov. 2016.
- BRITES, Felipe Gonçalves; SANTOS, Vinicius Puga de Almeida. **Motor de Passo**. Escola de Engenharia - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2008. Disponível em: <<http://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais/stepmotor/stepmotor2k81119.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2016.
- CALLEN, Herbert Bernard. **Thermodynamics and an introduction to thermostatics**. 2 ed. New York: [s.n.], 1985. 512 p.
- ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A.. **Termodinâmica**. 5 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006. 740 p.
- DIDATECH. **Termodinâmica**. Disponível em: <<http://www.didatech.com.br/termodinamica/>>. Acesso em: 20 out. 2016.
- ENGINEERS GARAGE. **Stepper motors or step motors**. Disponível em: <<http://www.engineersgarage.com/articles/stepper-motors?page=1>>. Acesso em: 22 nov. 2016.
- ESKADER. **Mini-ran, vetical boiler**. Disponível em: <<http://www.eskader.se/en/modellangmaskiner/4112-babcock-nr-500-tubangpanna.html>>. Acesso em: 11 out. 2017.
- Farah, M. A. **Petróleo e seus derivados**. LTC, 2012.
- FRANKLIN, Erick de Moraes. FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA - UNICAMP. **Prof. Dr. Erick de Moraes Franklin**. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~franklin/#>>. Acesso em: 02 out. 2016.
- GENEBRE. **Válvulas de esfera**. Disponível em: <<http://www.genebre.com.br/220-valvulas-de-esfera>>. Acesso em: 17 out. 2017.

HIBBELER, R. C.. **Resistência dos materiais**: Resistência dos materiais. 7ª ed. [S.L.]: Pearson, 2006. 641 p.

ILMANOMETRO. **Wholesaler pressure gauges, valves, fittings, thermometers**. Disponível em: <<http://www.ilmanometro.com/gb/dry-pressure-gauges-diameter-150mm/16-dry-pressure-gauge-1-bar-diameter-dn-150mm-1-2bsp-bottom.html>>. Acesso em: 02 out. 2017.

ISOVAL. **Válvula de retenção portinhola**. Disponível em: <<http://www.isoval.com.br/valvula-retencao-portinhola>>. Acesso em: 11 out. 2017.

MARTINELLI JR., Luiz Carlos. **Componentes e acessórios**. Disponível em: <<https://moodle.pb.utfpr.edu.br/>> Acesso em 14 jul. 2017 às 14:00.

MARTINELLI JR., Luiz Carlos. **Distribuição de Vapor**: Dimensionamento. Disponível em: <<https://moodle.pb.utfpr.edu.br/>>Acesso em 11 set. 2017 às 17:00.

MARTINELLI JR., Luiz Carlos. **Equipamentos de troca térmica**. Disponível em: <<https://moodle.pb.utfpr.edu.br/>> Acesso em 19 jul. 2017 às 11:00.

MARTINELLI JR., Luiz Carlos. **Geradores de Vapor**: Dimensionamento. Disponível em: <<https://moodle.pb.utfpr.edu.br/>>Acesso em 11 jun. 2017 às 10:00.

MARTINELLI JR., Luiz Carlos. **Tubulação de Vapor**: Dimensionamento. Disponível em: <<https://moodle.pb.utfpr.edu.br/>>Acesso em 17 ago. 2017 às 15:00.

MATHIAS, Arthur Cardozo. **Válvulas**: Industriais, Segurança e Controle. 1ª ed. [S.L.]: Artliber, 2008. 464 p.

Moran, M. J., e Shapiro, H. N., “**Fundamentals of Engineering Thermodynamics**”, John Wiley & Sons Inc, New York, 1996.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; ROCHA, Carlos R.; NOGUEIRA, Fábio José H. **Eficiência energética no uso do vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005. 196 p.

PANNONI, Fabio Domingos. **Aços Estruturais**. 2005.

PAZ, A. E. C., “**Simulação de Sistemas Térmicos de Potência para Geração de Energia Elétrica**”, 2002, Faculdade de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre.

Petrobrás. **Gás Liquefeito de Petróleo**. Informações técnicas. 2013.

PORTESBORGES. **The greatest wordpress.com site in all the land!**. Disponível em: <<https://portesborges.wordpress.com/2013/09/07/variantes-da-valvula-de-globo/>>. Acesso em: 11 out. 2017.

POTTER, Merle C.; SCOTT, Elaine P. **Ciências térmicas**: Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transmissão de Calor. São Paulo: Thomson, 2007, 772p.

REFRIGERATION DEVICE. **Condensador de refrigeração ar**. Disponível em: <<http://www.refrigerationdevice.com/>>. Acesso em: 29 out. 2017.

SAPIENSMAN. **Ofícios técnicos.** Disponível em: <<http://www.sapiensman.com/tecnoficio/docs/doc57.php>>. Acesso em: 17 nov. 2016.

SEARS, F. W., ZEMANSKY, M. W. **Física.** Brasília, v.2, Ed Universidade de Brasília, 1973.

SHAPIRO, Michael J.; Moran & Howard. **Fundamentals of engineering thermodynamics.** 3ª ed. [S.L.]: John Wiley, 1995.

SHIMANO. **Cubo dínamo.** Disponível em: <<http://bike.shimano.com.br/cubodinamo>>. Acesso em: 10 out. 2017.

SILVA, Diomenes, Cesario. **Projeto térmico de trocador de calor resfriado a ar.** 1980. 97p. Programa de pós graduação de engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 1980.

SILVA, Domiciano Correa Marques da. **Máquinas de Carnot;** *Brasil Escola.* Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/fisica/maquinas-carnot.htm>>. Acesso em 03 de outubro de 2016.

SILVA, Emilio C. Nelli. **Escola Politécnica da USP.** São Paulo, ago./set. 2017. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2481/Aula04-Tur.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2017.

SÓ FÍSICA. **2ª lei da termodinâmica.** Disponível em: <<http://www.sofisica.com.br/conteudos/termologia/termodinamica/2leidatermodinamica.php>>. Acesso em: 28 set. 2016.

SPIRAX SARCO. **Bem vindo ao mundo do vapor.** Disponível em: <<http://www.spiraxsarco.com/global/br/pages/home.aspx>>. Acesso em: 13 out. 2017.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Tubulações Industriais: Cálculo.** 7ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1987.

TORREIRA, Raul Peragallo. **Isolamento térmico: Frio e Calor.** São Paulo: Fulton Editora técnica Ltda, 1980. 1067 p.

UNIVERSIDADE DE COIMBRA. **Manômetro de bourdon.** Disponível em: <[http://www.eq.uc.pt/~lferreira/bibl\\_sem/global/bourdon/pdf/bourdon](http://www.eq.uc.pt/~lferreira/bibl_sem/global/bourdon/pdf/bourdon)>. Acesso em: 17 nov. 2016.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. **Máquinas térmicas.** Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/gef/calor/calor28.pdf>>. Acesso em: 28 set. 2016.

VOITH. **Turbinas pelton.** Disponível em: <<http://www.voith.com/br/produtos-e-servicos/energia-hidreletrica/turbinas/turbinas-pelton-563.html>>. Acesso em: 01 out. 2017.

WIKA. **Manômetro com tubo bourdon, liga de cobre.** Disponível em: <[http://www.wika.com.br/212\\_20\\_pt\\_br.wika](http://www.wika.com.br/212_20_pt_br.wika)>. Acesso em: 05 out. 2017.

WYLEN, Gordon Van; SONNTAG, Richard; BORGNAKKE, Claus. **Fundamentos da termodinâmica clássica.** 4ª ed. São Paulo: EDGARD BLÜCHER LTDA, 1995. 589

APÊNDICE A

