



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



Arthur Correa Brettas

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CALOR NA TUBULAÇÃO
DA CALDEIRA À TURBINA DE UM CICLO A VAPOR SIMPLES**

OURO PRETO - MG
2019

Arthur Correa Brettas
arthurcorreabrettas@yahoo.com.br

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CALOR NA TUBULAÇÃO
DA CALDEIRA À TURBINA DE UM CICLO A VAPOR SIMPLES**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Luís Antônio Bortolaia

OURO PRETO – MG
2019

B845a Brettas, Arthur Correa.
Análise da influência da perda de calor na tubulação da caldeira à turbina de um ciclo a vapor simples [manuscrito] / Arthur Correa Brettas. - 2019.

46f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Luis Antonio Bortolaia.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Tubulações. 2. Isolamento Térmico. 3. Centrais termoelétricas. 4. Energia Elétrica. I. Bortolaia, Luis Antonio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA

Ao 3º dia do mês de Julho do ano de dois mil e dezenove às 9 horas, no auditório da Escola de Minas, localizado na Escola de Minas - Campus Ouro Preto - UFOP, foi realizada a defesa de monografia do aluno **Arthur Correa Bretas**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Profª. DSc. Elisângela Martins Leal, Prof. DSc. Alisson Augusto Azevedo Figueiredo e Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia. O candidato apresentou o trabalho intitulado: **“Análise da influência da perda de calor na tubulação da caldeira à turbina de um ciclo a vapor simples”**, sob orientação do Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o aluno aprovado.

Ouro Preto, 03 de Julho de 2019.

Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia
Professor Orientador

Profª. DSc. Elisângela Martins Leal
Professor Avaliador

Prof. DSc. Alisson Augusto Azevedo Figueiredo
Professor Avaliador

Arthur Correa Bretas
Aluno

A Deus dedico mais esta etapa vencida,
Aos meus pais, pelo apoio incondicional
Ao Bortolaia por me guiar neste trabalho
A república Uai Mano, pelo companheirismo.

AGRADECIMENTO

A Deus por ter me dado o privilégio de estar nessa Universidade.

Ao meu orientador Luis Antônio Bortolaia, pelo incentivo e orientação neste trabalho.

Aos meus pais Moacyr e Carmen pelo suporte durante toda a minha vida.

Ao meu irmão Pedro, por sempre me incentivar e me apoiar nos momentos de dúvida.

Aos amigos da Engenharia Mecânica pelas amizades, rocks e ferrações.

A todos os professores da Engenharia Mecânica e à UFOP, pelos valiosos conhecimentos transmitidos ao longo desses anos

Aos irmãos da República Uai Mano por se tornarem uma segunda família.

“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder o entusiasmo”.

Winston Churchill

RESUMO

No mundo inteiro, um dos principais meios de geração de energia elétrica é a geração termelétrica, que é feita a partir de centrais termelétricas. Uma termelétrica a vapor é composta basicamente dos seguintes elementos: caldeira (gerador de vapor), turbina a vapor, condensador e um sistema de bombeamento, além das tubulações que transportam o fluido ao longo de todo o sistema. Neste trabalho será analisada a tubulação que leva o vapor da caldeira até a turbina. O aspecto analisado será a perda de calor e pressão para a tubulação nessa etapa do processo, avaliando diversos tipos de materiais da tubulação e isolamento utilizados e a influência dessas perdas na eficiência térmica da instalação. No trabalho foi encontrado que os fatores mais relevantes em termos de eficiência térmica, ao se variar o material da tubulação e o isolamento são a temperatura e a entalpia na entrada da turbina. Como resultados foram obtidos que as combinações de lã de vidro possuem maior eficiência térmica, resultando em uma produção de energia mais eficiente. Foi encontrado também que uma alteração pura do isolamento, pode reduzir em 60 % a perda de calor nas tubulações.

Palavras-chave: tubulações, energia elétrica, centrais termelétricas, isolamento térmico, eficiência térmica, perda de calor.

ABSTRACT

Worldwide, one of the main means of generating electricity is thermoelectric generation, which is made from thermoelectric power plants. A steam thermoelectric plant is basically composed of the following elements: boiler (steam generator), steam turbine, condenser and a pumping system, in addition to the pipes that carry the fluid throughout the system. This work will analyze the piping that takes the steam from the boiler to the turbine. The analyzed aspect will be the loss of heat and pressure for the pipe in this stage of the process, evaluating several types of pipe materials and insulation used and the influence of these losses on the thermal efficiency of the installation. In the work it was found that the most relevant factors in terms of thermal efficiency, when varying the material of the pipe and the insulation are the temperature and the enthalpy at the entrance of the turbine. As were found the combinations of glass wool with greater thermal power, resulting in a more efficient energy production. It was also found with the same intensity of insulation, can reduce by 60% the heat loss in the pipes.

Key-words: pipelines, electric power, thermoelectric power plants, thermal insulation, thermal efficiency, heat loss.

LISTA DE SIMBOLOS

q – taxa de calor.....	<i>kW</i>
A - Área da seção.....	<i>m²</i>
k - Condutividade térmica.....	<i>W/mK</i>
h - coeficiente local de transferência de calor por convecção.....	<i>W/m²K</i>
<i>T_s</i> - temperatura da superfície.....	<i>K</i>
<i>T_∞</i> - temperatura do fluido.....	<i>K</i>
$\Delta\rho$ - diferença em massa específica entre as duas parcelas de material.....	<i>kg/m³</i>
g - aceleração gravitacional local.....	<i>m/s²</i>
L - comprimento-medida característico de convecção.....	<i>m</i>
μ - a viscosidade dinâmica.....	<i>Pa.s</i>
U - coeficiente global de transferência de calor.....	<i>W/m²K</i>
L - comprimento da seção.....	<i>m</i>
A - difusividade térmica.....	<i>m²/s</i>
ΔE_p - variação de energia potencial.....	<i>kJ</i>
ΔE_c - variação de energia cinética.....	<i>kJ</i>
h - entalpia.....	<i>kJ/kg</i>
\dot{m} - vazão mássica da tubulação.....	<i>kg/s</i>
V - volume específico	<i>m³/kg</i>
v - velocidade de escoamento.....	<i>m/s</i>
d - diâmetro da tubulação.....	<i>mm</i>
D _h - diâmetro hidráulico.....	<i>mm</i>
Nu - número de Nusselt.....	(-)
Pr - Número de Prandtl.....	(-)
Re Número de Reynolds.....	(-)

T_f - temperatura de filme.....	K
c_p - calor específico.....	$kJ/kg.K$
k_w - condutividade do fluido.....	W/mK
ΔP - diferença de pressão.....	kPa
x - título.....	$\%$
η - eficiência.....	$\%$

LISTA DE FIGURAS

1 - Esquema de radiação incidente.....	10
2 - Esquema de geração termelétrica.....	11
3 - Central termelétrica de Angra dos Reis.....	12
4 - Diagrama temperatura x entropia para ciclo de vapor super-aquecido.....	17
5 - Diagrama Txs.....	19
6 -Esquema do ciclo Rankine.....	19
7 - Esquema com os principais materiais de tubulação.....	21
8 - Esquema dos principais tipos de tubulação.....	22
9 - Esquema de seleção para isolamentos de tubulações.....	25
10 - Tabela de isolamentos.....	25
11 - Fluxograma de sequência das ações presentes no trabalho.....	28
12 - Representação do ciclo adotado.....	32
13 - Catálogo Açotubo.....	33
14 - Configuração do tubo.....	33
15 - Representação das resistências ao longo do tubo.....	33

LISTA DE TABELAS

1 - Especificações de tubulações e seus materiais.....	24
2 - Tabela de indicadores e variáveis.....	29
3 - Combinações calculadas.....	37
4 - Resultados obtidos até o ponto 3.....	37
5 - Resultados e eficiência.....	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Mecanismos da transferência de calor e	4
2.1.1	Condução.....	4
2.1.2	Convecção.....	5
2.1.2.1	Convecção natural.....	6
2.1.2.2	Convecção forçada.....	7
2.1.3	Radiação ou irradiação.....	7
2.2	Geração Termelétrica.....	9
2.2.1	Combustíveis.....	11
2.2.1.2	Petróleo e Seus Derivados.....	12
2.2.1.3	Carvão Mineral.....	12
2.2.1.4	Gás Natural.....	13
2.2.1.5	Combustíveis Nucleares.....	13
2.2.1.6	Biomassa.....	14
2.2.2	Esquemas e configurações de centrais termelétricas.....	14
2.2.2.1	Centrais a Diesel.....	15
2.2.2.2	Centrais a vapor (Não Nucleares).....	15
2.2.2.3	Centrais Nucleares.....	15
2.2.2.4	Centrais a gás.....	16
2.3	Ciclos de Potência a Vapor.....	16

2.3.1 Ciclo Rankine	17
2.4 Dutos e tubulações	20
2.4.1 Principais materiais para fabricação de tubos.....	20
2.4.2 Empregos das tubulações Industriais.....	20
2.4.3 Seleção de materiais para tubulação.....	21
2.4.4 Tubulação para vapor.....	22
2.4.5 Tubulação para usinas termelétricas.....	23
2.5 Isolantes para tubulação a vapor.....	24
3 METODOLOGIA.....	265
3.1 Tipos de pesquisa.....	25
3.2 Materiais e Métodos.....	27
3.3 Instrumento de coleta de dados.....	27
3.4 Variáveis e indicadores.....	27
3.5 Tabulação de dados.....	28
3.6 Considerações Finais do Capítulo.....	28
4 RESULTADOS	310
4.1 Considerações iniciais.....	30
4.1.2 Cálculo do diâmetro da tubulação.....	31
4.2 Cálculo da perda de calor por convecção interna do tubo.....	32
4.3 Cálculo da perda de pressão na tubulação.....	35
4.4 Cálculo da eficiência térmica do ciclo.....	35
4.5 Cálculos realizados.....	35
5 CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	45

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Atualmente o mundo inteiro depende diretamente da energia elétrica, que está presente em todas as etapas do dia a dia das pessoas. Durante todo o dia, é consumida energia elétrica de alguma forma. Portanto a geração da mesma é importante.

Existem diversas formas de geração de energia elétrica, como hidrelétrica, solar, nuclear, eólica, biomassa, sendo que uma das mais utilizadas é a energia termelétrica. Só no Brasil existem cerca de 50 usinas termelétricas, gerando 41 mil MW de energia, correspondendo à 25% da participação no nosso sistema elétrico (Ministério das Minas e Energia, 2016).

A energia termelétrica, é gerada a partir das centrais termelétricas que realizam a transformação de energia térmica (calor) em energia elétrica (VAN WYLEN & SONNTAG, 1994). Existem diversos tipos de centrais termelétricas, variando o tipo de combustível que pode ser, petróleo, gás natural, carvão mineral, combustível nuclear, entre outros. Essas mesmas centrais, podem variar das centrais a gás ou a vapor, de acordo com o tipo da turbina.

As centrais termelétricas a vapor, funcionam através do ciclo de Rankine. É termodinâmico que funciona convertendo calor em trabalho. O calor é fornecido à caldeira por uma fonte de calor externa, geralmente utilizando a água como fluido operante. Este ciclo gera cerca de 90% de toda a energia elétrica produzida no mundo, incluindo virtualmente toda a energia solar, biomassa, carvão e nuclear obtida em usinas. (WISER. 2000)

Para Moran e Shapiro (2000), esse ciclo é composto por quatro processos principais: Processo 4-1: Primeiro, o fluido de trabalho é bombeado (idealmente numa forma adiabática reversível) de uma pressão baixa para uma pressão alta utilizando-se uma bomba. O bombeamento requer algum tipo de energia para se realizar.

Processo 1-2: O fluido pressurizado entra numa caldeira, onde é aquecido a pressão constante até se tornar vapor superaquecido. Fontes comuns de calor incluem carvão, gás natural e energia nuclear.

Processo 2-3: O vapor superaquecido expande através de uma turbina para gerar trabalho. Idealmente, esta expansão é adiabática reversível. Com esta expansão, tanto a pressão quanto a temperatura se reduzem.

Processo 3-4: O vapor então entra num condensador, onde ele é resfriado, idealmente a pressão constante, até a condição de líquido saturado. Este líquido então retorna à bomba e o ciclo se repete.

Como mostrado na descrição anterior, existem 4 equipamentos principais o condensador as bombas a caldeira e a turbina a vapor. Tais elementos estão todos interligados por tubulações, sendo a mais crítica a tubulação de vapor, que liga a caldeira à turbina.

Tais tubulações deverão transportar grandes volumes de vapor com a menor queda de pressão possível ao longo de seu comprimento, além da menor perda de calor e de carga possível (LORA e NASCIMENTO, 2004). Ao longo do comprimento dessa tubulação ocorre portanto a perda de calor e de carga do fluido para essa tubulação, o que sugere a seguinte problemática:

Como calcular a perda de calor e de pressão ao longo de uma tubulação de caldeira, analisando-se os principais materiais de tubulação e isolamento, e qual a perda de eficiência na geração de energia elétrica?

1.2 Justificativa

As centrais termelétricas a vapor são largamente utilizadas para geração de energia elétrica, e possuem equipamentos de alta responsabilidade. Esse sistema utilizado nas centrais termelétricas funciona com o ciclo Rankine, que segundo Van Wylen, Gordon J Sonntag, (1994) atinge cerca de 42 % de eficiência térmica (com queima de carvão, a eficiência varia de combustível para combustível), pois ao longo do processo, ocorrem diversas perdas de energia térmica, para tubulações e outros componentes, como por exemplo as bombas das tubulações, a perda de calor pelo contato com as válvulas, e energia que é transformada em ruído, e outros tipos de perdas podem ocorrer de acordo com as particularidades construtivas da central.

As perdas de calor para as tubulações ocorrem por condução, radiação e convecção, que segundo Incropera, e De Witt (2003) além da transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório (difusão), a energia também é transferida através do movimento global ou macroscópico do fluido. Esse movimento do fluido está associado ao fato de que, em um instante qualquer um grande número de moléculas está se movendo coletivamente. Tal movimento, quando existe gradiente de temperatura, contribui para transferência de calor.

Diante disso, no presente trabalho, será estudada a perda de calor nos diferentes materiais de tubulação de vapor que conecta a caldeira a turbina.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Calcular a perda de calor e de pressão em diferentes materiais de tubulação e de isolamentos no trecho que conecta a caldeira à turbina a vapor, e avaliar o impacto dessa perda na eficiência de geração de energia.

1.3.2 Específicos

Realizar estudos teóricos sobre: mecanismos de transferência de calor, geração termelétrica, ciclo Rankine, materiais para dutos e tubulações de vapor.

Calcular as perdas de calor e de pressão ao longo da tubulação de caldeiras com os principais materiais aplicados e seus respectivos isolamentos térmicos.

Avaliar as perdas de eficiência na geração de energia, devido à perda de calor e de pressão.

Comparar os principais materiais utilizados para tubulação de vapor.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos, no qual o primeiro se refere à introdução e contextualização, objetivos e formulação do problema.

O segundo capítulo se refere à revisão bibliográfica, que apresenta uma visão sobre a matriz energética do Brasil e do mundo, conceitos sobre centrais termelétricas, seu funcionamento e seus equipamentos, aprofundando nas tubulações que ligam a caldeira à turbina a vapor, mostrando os principais materiais utilizados para construção dessas tubulações e seus respectivos isolantes, e as perdas de calor para cada combinação de material e isolante, apontando vantagens e desvantagens de cada um.

O terceiro capítulo é referente à metodologia para realização do trabalho, envolvendo os materiais utilizados, as variáveis e os indicadores, serão realizados os cálculos e as variações que serão aplicadas.

O capítulo quatro destaca os resultados obtidos nos cálculos realizados, os quais serão comparados entre si. O capítulo cinco apresenta as conclusões do sistema proposto e sugestões de estudos seguintes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste presente capítulo serão apresentados conceitos de transferência de calor, de ciclos de geração termelétrica e de tubulações de vapor.

2.1 Mecanismos da transferência de calor

Segundo Incropera e De Witt (2003) a transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura. Sempre que existir uma diferença de temperaturas em um meio ou entre meios, haverá, necessariamente, transferência de calor.

É importante entender os mecanismos da transferência de calor, os mesmos são: condução, convecção e radiação (YUNUS e ÇENGEL, 2002).

2.1.1 Condução

No estudo da transferência de calor, condução térmica é a transferência de energia térmica entre átomos e/ou moléculas vizinhas em uma substância devido a um gradiente de temperatura. Ou seja, é um fenômeno de transferência térmica causado por uma diferença de temperatura entre duas regiões em um mesmo meio ou entre dois meios em contato no qual não se percebe movimento global da matéria na escala macroscópica, em oposição à convecção que é outra forma de transferência térmica (PÉRES e ROMULUS, 1993).

A condução do calor ocorre em todas as formas de matéria, sólidos, líquidos, gases e plasmas, e não requer qualquer movimento macroscópico de massa da matéria condutora, mas apenas de seus componentes subatômicos ou sua vibração, em escala microscópica. A condução é o meio mais importante de transferência de calor dentro de um sólido ou objetos sólidos em contato térmico. A condução é maior nos sólidos, pois a rede espacial de relações relativamente fixas entre os átomos contribui para a transferência de energia entre eles por vibração (YOUNG e FREEDMAN, 2008).

Para quantificar a facilidade com a qual um meio particular conduz calor, é empregada a condutividade térmica, também conhecida como constante ou coeficiente de condutividade, k . A condutividade térmica k é definida como a quantidade de calor, q , transmitida num tempo t através de uma espessura L , em uma direção normal à superfície de área A , devido à diferença de temperatura. Condutividade térmica é uma propriedade do material que depende da fase do meio, temperatura, densidade, e ligação molecular (HALLIDAY e RESNICK, 1996).

A lei da condução térmica, também conhecida como Lei de Fourier, estabelece que o fluxo de calor através de um material é proporcional ao gradiente negativo de temperatura. Podemos enunciar esta lei de duas formas equivalentes: a forma integral, em que olhamos para a quantidade de energia que flui para dentro ou para fora de um corpo como um todo; e a forma diferencial, em que olhamos para os fluxos de energia localmente. O fluxo de calor é a quantidade de energia que flui através de uma unidade de área por unidade de tempo.

Pode-se determinar o fluxo de calor transportado por condução pela Lei de Fourier através da equação:

$$q'' = \frac{q}{A} = -k \frac{\delta T}{\delta x} \quad (2.1)$$

Em que:

q'' - fluxo de calor transmitido (W/m^2)

q - taxa de transferência de calor (W);

A - área da seção (m^2);

K - condutividade térmica (W/m.K);

δt - diferença de temperatura (K);

$\delta x = L$ - espessura do meio (m);

2.1.2 Convecção

Outro mecanismo de transferência de calor é a convecção, ou convecção térmica. Este refere-se à transferência de calor que irá ocorrer entre uma superfície e um fluido em movimento quando eles estão em temperaturas diferentes (INCROPERA & DEWITT, 1990). A equação geral da convecção é dada por:

$$q'' = \frac{q}{A} = h(T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

Sendo:

h - coeficiente local de transferência de calor por convecção (W/m^2K);

T_s - temperatura da superfície (K);

T_{∞} - temperatura do fluido (K);

A convecção pode ser subdividida em convecção natural e convecção forçada.

2.1.2.1 Convecção natural

Na convecção natural o calor é transferido pela circulação de fluidos devido a flutuação ocasionada a mudanças de densidade induzidas pelo próprio calor, então o processo é conhecido como convecção natural ou convecção livre (HOLMAN, 1983).

Segundo Holman (1983) a convecção natural ocorre quando um sistema torna-se instável e conseqüentemente inicia-se um processo de mistura pelo movimento de massa. Uma observação comum de convecção é a da convecção térmica em um recipiente de água fervente, na qual a água quente e menos densa na camada do fundo ergue-se em plumas, em movimentos de baixo para cima, e a água fria e mais densa perto do topo do recipiente igualmente afunda.

O estabelecimento do processo de convecção natural é determinado pelo número de Rayleigh (Ra). Este número adimensional é dado por:

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_{\infty})L^3 Pr}{\nu^2} \quad (2.3)$$

Sendo:

g - aceleração gravitacional local (m/s^2);

ν - viscosidade cinemática do fluido (m^2/s)

L - comprimento característico de geometria (m);

D - a difusividade da característica que está causando a convecção;

B - coeficiente de expansão volumétrica (1/K);

T_s - temperatura da superfície (K);

T_{∞} - temperatura da superfície (K);

Pr - número de Prandtl do fluido (adimensional);

O número de Nusselt para a convecção, natural e forçada é dada por:

$$Nu = \frac{h}{k} \cdot L \quad (2.4)$$

Sendo:

Nu – número de Nusselt (adimensional);

k – condutividade térmica do fluido (W/m.K);

As relações de transferência de calor por convecção natural tem por base estudos experimentais. A correlação experimental para o número de Nusselt médio para a convecção natural sobre uma tubulação horizontal é expressa por (ÇENGEL e GHAJAR, 2012):

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 * R_{ad}^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{1}{4}}} \right\}^2 \quad (2.5)$$

Para $R_{ad} \leq 10^{12}$ e $L = D$.

2.1.2.2 Convecção forçada

A convecção forçada é um mecanismo ou tipo de transporte de calor no qual o movimento do fluido é gerado por uma fonte externa (como uma bomba, ventilador, dispositivo de sucção, etc.). Deve ser considerada como um dos principais métodos de transferência de calor útil com a qual quantidades significativas de energia térmica calor podem ser transportadas de forma muito eficiente. Este mecanismo é muito comumente encontrado na vida cotidiana, incluindo aquecimento central, ar condicionado, turbinas a vapor e em muitas outras máquinas (CEBECI e TUNCER, 2002)

No entanto, em qualquer situação de convecção forçada, sempre ocorrerá a convecção natural quando houver forças gravitacionais presentes. Quando a convecção natural não é desprezível, esses fluxos são geralmente referidos como convecção mista (CEBECI e TUNCER, 2002)

Segundo HOLMAN (1983), a convecção forçada pode ser dada pela seguinte equação:

$$Nu = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^n \quad (2.6)$$

2.1.3 Radiação

O terceiro mecanismo de transferência de calor é a radiação ou irradiação térmica, que é a radiação eletromagnética gerada pelo movimento térmico das partículas carregadas na matéria. Toda matéria com uma temperatura maior que o zero absoluto emite radiação térmica. O movimento de partículas resulta em aceleração de carga ou oscilação de dipolo que produz radiação eletromagnética; no entanto, uma interferência destrutiva pode cancelar toda a

radiação. Muitas vezes a irradiação térmica é chamada de radiação de corpo negro, uma radiação eletromagnética-térmica dentro ou ao redor de um corpo, se um objeto emissor de radiação atende às características físicas de um corpo negro em equilíbrio termodinâmico.

A radiação que é emitida pela superfície tem sua origem na energia térmica da matéria limitada pela superfície. A taxa pela qual a energia é liberada por unidade de área (W/m^2) é denominada poder emissivo E da superfície (INCROPERA e DEWITT, 2003).

A Lei de Stefan-Boltzmann estabelece que a energia total irradiada por unidade de área superficial de um corpo negro, na unidade de tempo (radiação do corpo negro), ou densidade de fluxo energético, E_{cn} é diretamente proporcional à quarta potência da sua temperatura absoluta (EISBERG & RESNICK, 1979):

$$E_{cn} = \sigma T_s^4 \quad (2.7)$$

Sendo:

E_{cn} – potência emissiva do corpo negro (W/m^2);

T_s : a temperatura absoluta (K) da superfície (K);

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$);

A superfície que emite radiação de acordo com a equação de Stefan-Boltzmann é chamada de radiador ideal ou corpo negro.

O fluxo de calor emitido por uma superfície real é dado por:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.8)$$

Em que:

ε - propriedade radiante da superfície, denominada emissividade ($0 \leq \varepsilon \leq 1$). A emissividade depende do material da superfície e do seu acabamento (EISBERG e RESNICK, 1979).

A radiação pode incidir sobre uma superfície a partir de sua vizinhança. A taxa em que todas as radiações incidem sobre uma área unitária da superfície é designada por radiação incidente ou irradiação, G (BLUNDELL, 2006).

A radiação incidente pode ser absorvida, refletida ou transmitida, dependendo da superfície. A Figura 1 mostra estas radiações.

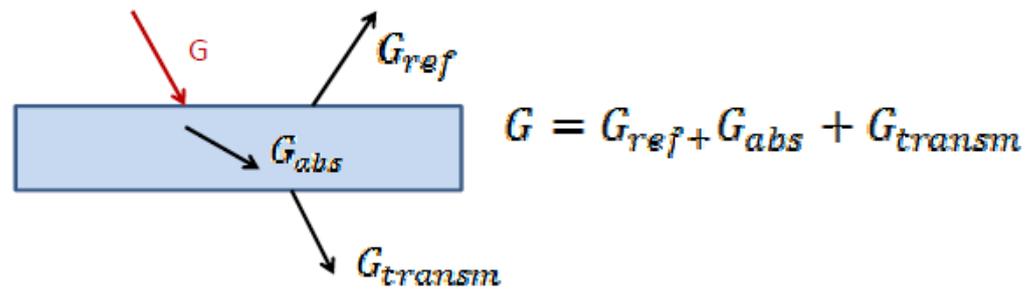


Figura 1 Esquema de radiação incidente.

Fonte: Van Wylen & Sonntag (1986).

A irradiação (radiação incidente) absorvida é dada por:

$$G_{abs} = \alpha G \quad (2.9)$$

α – absorvidade que é uma propriedade radiante da superfície.

2.2 Geração Termelétrica

O processo fundamental de funcionamento das centrais termelétricas está baseado na conversão de energia térmica em energia mecânica e desta em energia elétrica.

A conversão da energia em energia mecânica ocorre através do uso de um fluido que produzirá trabalho em seu processo de expansão, em turbinas térmicas. A conversão da energia mecânica em elétrica se dá através do acionamento mecânico de um gerador elétrico acoplado ao eixo da turbina.

Segundo Van Wylen (1994) a produção da energia térmica pode se dar pela transformação da energia química dos combustíveis, através do processo da combustão, ou da energia nuclear dos combustíveis radioativos, através da fissão nuclear. Centrais cuja geração é baseada na combustão são conhecidas como termelétricas e as outras citadas, como centrais nucleares. As centrais termelétricas (convencionais), podem ser classificadas de acordo com o método de combustão utilizado. Pode-se distinguir:

- Combustão externa, em que o combustível não entra em contato com o fluido de trabalho. A combustão externa é um processo usado principalmente nas centrais termoelétricas a vapor, onde o combustível aquece o fluido de trabalho (em geral água) em uma caldeira até gerar o vapor que, ao se expandir em uma turbina, produzirá trabalho mecânico;

- Combustão interna, em que a combustão se efetua sobre uma mistura de ar e combustível. Dessa maneira, o fluido de trabalho será o conjunto de produtos da combustão. A combustão interna é o processo usado principalmente nas turbinas a gás e nas máquinas térmicas a pistão (Motores Diesel).

A figura 2 apresenta um esquema simplificado de uma central termelétrica com combustão externa (a vapor). A queima de combustível gera calor que transforma o líquido em vapor na caldeira. O vapor se expande (pressão passa de alta à baixa) na turbina a vapor, gerando energia. O vapor que sai da turbina vai ao condensador, onde calor é retirado e se obtém líquido. O líquido é bombeado de volta a caldeira, fechando o ciclo (VAN WYLEN, 1994).

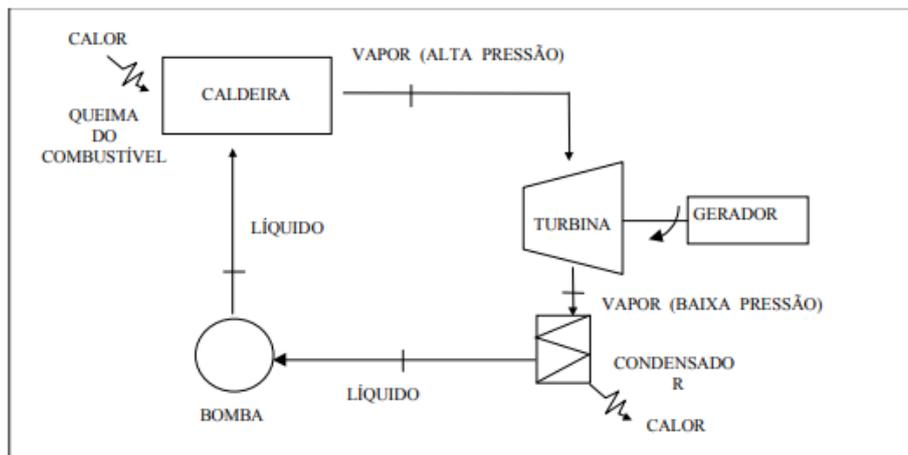


Figura 2 Esquema de geração termelétrica.

Fonte: Wiser (2000)

A figura 2 mostra um esquema simplificado de geração termelétrica e seus principais componentes.

Os principais combustíveis usualmente aplicados nas centrais a vapor são o óleo, o carvão, a biomassa (madeira, bagaço de cana, lixo,...) e derivados pesados de petróleo. Os principais combustíveis usados nas máquinas térmicas a gás são o gás natural e o óleo Diesel e gasolina, entre outros.

Já no caso da central nuclear, o calor para o aquecimento da água não é produzido por processo de combustão, mas sim pela energia gerada pelo processo de fissão nuclear (reação nuclear controlada em cadeia). A figura 3 apresenta o PWR ("Pressurized Water Reactor"-Reator à Água Pressurizada), um tipo de reator nuclear. Nesta, pode-se visualizar no interior do edifício do reator, o gerador de vapor, conectado ao reator nuclear, que produz o calor, sendo que o restante do esquema é similar ao das centrais térmicas convencionais a vapor

A grande maioria destes combustíveis, os denominados combustíveis fósseis (derivados do petróleo, carvão mineral, gás natural), assim como os nucleares (elementos radioativos: urânio, tório, plutônio, etc.) são classificados como fonte primária não renovável, devido ao enorme tempo necessário para sua reposição pela natureza. Outros podem ser utilizados como fontes renováveis, como a biomassa advinda de plantações manejadas (florestas energéticas e o bagaço de cana de açúcar, por exemplo) (VAN WYLEN e SONNTAG, 1986).

2.2.1.2 Petróleo e Seus Derivados

O petróleo, também conhecido como óleo cru, é encontrado, na maioria das vezes, em depósitos subterrâneos e é retirado através de poços. É formado basicamente por hidrocarbonetos, de fórmula geral C_nH_n , de onde saem, por destilação, seus inúmeros derivados. Sua utilização implica necessariamente em danos ambientais, pois emite óxidos de enxofre, nitrogênio, e de carbono, contribuindo para o efeito estufa.

Hoje, o petróleo é o principal componente da matriz energética mundial, apresentando uma ampla gama de utilização em diversos setores. Seu uso implica não somente nos custos decorrentes de sua importação, mas também nos danos ambientais e na dependência e vulnerabilidade estratégica dos países desenvolvidos em relação aos do Oriente Médio, onde se encontram as maiores reservas de petróleo do mundo.

O petróleo é o principal responsável pela geração de energia elétrica em diversos países do mundo. Apesar da expansão recente da hidroeletricidade e da diversificação das fontes de geração de energia elétrica verificadas nas últimas décadas, o petróleo ainda é responsável por cerca de 8% de toda a eletricidade gerada no mundo (CCEE, 2016).

2.2.1.3 Carvão Mineral

O carvão mineral já era conhecido e utilizado na China em 1100 a.C., mas só passou a ser difundido com o advento da Revolução Industrial no século XVII, como fonte de energia para as máquinas a vapor. Sua utilização foi necessária devido à crise da madeira combustível no século XVI.

Em participação na matriz energética mundial, o carvão é responsável por cerca de 8% de todo o consumo mundial de energia e de 39% de toda a energia elétrica gerada. Para assegurar a preservação do carvão na matriz energética mundial, atendendo às metas ambientais, têm sido pesquisadas e desenvolvidas tecnologias de remoção de impurezas e de combustão eficiente do carvão. (Dados da CCEE, 2017).

2.2.1.4 Gás Natural

O gás natural é o nome dado a uma mistura de hidrocarbonetos e impurezas, sendo basicamente composto pelo metano (seu principal componente), etano, propano, butano e outros mais pesados. As impurezas e contaminantes (dióxido de carbono e gás sulfídrico) são removidos antes de sua utilização comercial (WILLIAMS et al. 1992).

O GN é hoje o terceiro combustível na matriz energética mundial, e pode, com exceção do querosene de aviação, substituir qualquer combustível sólido, líquido ou gasoso. Embora seja uma fonte não renovável, sua composição faz com que seja pouco poluente, basicamente a emissão de CO_2 , apresentando relevantes benefícios ambientais na substituição do petróleo e carvão mineral. Tal substituição, no entanto, vem ocorrendo moderadamente, devido ao alto custo inicial da construção da malha de gasodutos necessária para o transporte do GN, que o encarece frente aos preços do petróleo e carvão mineral, sendo este o maior entrave à sua ampla utilização (WILLIAMS et al. 1992).

O GN alimenta aproximadamente 12,8% das termelétricas mundiais, mas que são responsáveis por menos de 3% da energia elétrica primária produzida no mundo. Embora ainda seja um montante tímido, a tendência é de aumento deste número, seja por questões ambientais, seja para diminuição da dependência do petróleo e carvão mineral (WILLIAMS et al. 1992).

2.2.1.5 Combustíveis Nucleares

A energia nuclear aproveita a propriedade de certos isótopos de urânio de se dividirem, liberando grande quantidade de energia térmica, em um processo conhecido como fissão nuclear (SANTOS *et al.* 1977).

A energia atômica também pode ser utilizada através de um processo conhecido como fusão nuclear, baseado não na quebra, mas na junção de núcleos atômicos. Embora a quantidade de energia liberada seja muito alta, este processo não apresenta tecnologia que permita seu aproveitamento comercial (SANTOS *et al.* 1977).

O urânio se apresenta, na natureza, associado a outros elementos. Na maioria das centrais é necessário que o combustível nuclear passe pelo processo conhecido como enriquecimento do urânio, que demanda grande tecnologia (SANTOS *et al.* 1977).

2.2.1.6 Biomassa

A biomassa é aproveitada energeticamente através do uso do etanol, bagaço de cana, carvão vegetal, óleo vegetal, lenha e outros. Historicamente, a biomassa vem sendo substituída pelos combustíveis fósseis, desde o século XVI, com a crise da madeira combustível na Inglaterra (WILLIAMS *et al.* 1992).

A biomassa é uma fonte de energia renovável (quando manejada adequadamente) e apresenta balanço zero de emissões, pois não emite óxidos de nitrogênio e enxofre, e o CO₂ emitido na queima é absorvido na fotossíntese, apresentando vantagens ambientais inexistentes em qualquer combustível fóssil. Tais características devem, futuramente, reverter a tendência de troca de combustíveis, passando a biomassa a retomar espaços ocupados pelo petróleo e o carvão mineral (WILLIAMS *et al.* 1992).

A biomassa ainda não dispõe de uma avaliação que permita quantificar confiavelmente sua participação atual na matriz energética mundial. Sabe-se que tem maior participação na matriz de países subdesenvolvidos, mas apresenta importância crescente nos países desenvolvidos, como fonte de energia renovável, em meio a um cenário de preservação ambiental (WILLIAMS *et al.* 1992).

O crescimento da biomassa tem como principal fator limitante os baixos preços dos combustíveis fósseis, necessitando até então de subsídios para tornar-se competitiva economicamente. Outro fator negativo de sua utilização é o fato de a mesma concorrer com a produção de alimentos, tanto física quanto economicamente (WILLIAMS *et al.* 1992).

2.2.2 Configurações de centrais termelétricas

A seguir são apresentados, de forma sucinta, os principais tipos de Centrais Termelétricas, constando de Centrais Diesel, Centrais a Vapor (não nucleares), Centrais Nucleares, Centrais a Gás (WILLIAMS *et al.* 1992).

2.2.2.1 Centrais a Diesel

São as centrais similares as centrais a vapor, com configuração em que seguem o ciclo Diesel. Apresentam as seguintes características:

- São muito usadas em potências até 40 MW. No Brasil, seu uso é disseminado para alimentação de sistemas isolados, em regiões longínquas sem outra fonte de geração (Amazônia, Rondônia, etc.) (WILLIAMS *et al.* 1992).

- Apresentam limitações relacionadas com: potência, ruído, vibração.

- Têm como vantagens, a rápida entrada em carga, a fácil operação, o fácil plano de manutenção. E, como problemas: a dificuldade de aquisição de peças de reposição e seu transporte, assim como, principalmente nos locais distantes, os altos custos do combustível (WILLIAMS *et al.* 1992).

2.2.2.2 Centrais a vapor (Não Nucleares)

Podem trabalhar tanto em ciclo aberto como em ciclo fechado. A operação em ciclo aberto é bastante comum quando se pretende utilizar calor (vapor) para o processo. Quanto à operação em ciclos fechados, pode-se operar somente com um fluido de trabalho, ou com mais de um fluido de trabalho (operação em ciclos superpostos) (WILLIAMS *et al.* 1992).

2.2.2.3 Centrais Nucleares

Central nuclear (português europeu) ou usina nuclear (português brasileiro) é uma instalação industrial empregada para produzir eletricidade a partir de energia nuclear. Caracteriza-se pelo uso de materiais radioativos que produzem calor como resultado de uma reação nuclear. As centrais nucleares usam esse calor para gerar vapor, que é usado para girar turbinas e produzir energia elétrica (COTTINGHAM e GREENWOOD, 1986).

As centrais nucleares apresentam um ou mais reatores, que são compartimentos impermeáveis à radiação, em cujo interior são colocadas barras de controle ou outras configurações geométricas de minerais com algum elemento radioativo (em geral o urânio). No processo de fissão nuclear, estabelece-se uma reação em cadeia que é sustentada e moderada mediante o uso de elementos auxiliares, dependendo do tipo de tecnologia empregada (COTTINGHAM e GREENWOOD, 1986).

2.2.2.4 Centrais a gás

São máquinas acionadas pela expansão dos gases quentes produzidos numa câmara de combustão, segundo um ciclo térmico denominado Brayton. A turbina a gás atinge eficiências termodinâmicas bem mais elevadas que a turbina a vapor, pois a maior temperatura atingida pelo ciclo turbinas a gás é de aproximadamente 1260°C que é bem mais elevada (aproximadamente 540°C para ciclos a vapor) (SANTOS *et al.* 1977).

Uma vantagem termodinâmica inerente das turbinas a gás é aproveitar o calor de escape das mesmas para produzir vapor numa caldeira de recuperação, que pode ser usada em processos industriais numa configuração de cogeração (SANTOS *et al.* 1977).

2.3 Ciclos de Potência a Vapor

Aqui é realizada a abordagem termodinâmica unicamente para o ciclo de geração de potência a vapor (LORA e NASCIMENTO, 2004).

As características básicas do ciclo de geração de potência a vapor são:

- o fluido de trabalho normalmente é água;
- o combustível é fóssil nas aplicações de geração de eletricidade de grande capacidade, embora em outras aplicações usa-se também a biomassa;
- seus componentes principais são a turbina a vapor, o condensador, a bomba de alimentação, o gerador de vapor (caldeira e superaquecedor), a chaminé, o gerador elétrico e o sistema de resfriamento.

Do ponto de vista termodinâmico, o ciclo de geração de potência a vapor é conhecido como ciclo “Rankine”. Um diagrama temperatura – entropia é mostrado na figura 4:

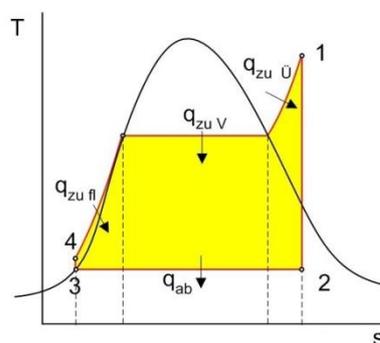


Figura 4 Diagrama temperatura x entropia para ciclo de vapor super-aquecido.
Fonte: Moran e Shapiro (2002)

2.3.1 Ciclo Rankine

Segundo Van Wylen e Sonntag (1986) o ciclo Rankine mostra o ciclo fechado do processo do fluido nas máquinas térmicas, sendo geralmente utilizado nas usinas de geração elétrica a partir da combustão de combustíveis fósseis como o carvão, gás natural e também da fissão nuclear de forma a obter calor, uma vez que quanto maior a temperatura, melhor a produção de energia.

A eficiência do ciclo é limitada pelo alto calor de vaporização do fluido de trabalho. Além disso, a menos que a pressão e a temperatura alcancem níveis críticos superiores na caldeira a vapor, o máximo que a temperatura pode operar ainda é bastante pequeno: as temperaturas de entrada da turbina a vapor são tipicamente em torno de 565°C e as temperaturas do condensador de vapor são em torno de 30°C (VAN WYLEN e SONNTAG, 1986).

Existem quatro processos num ciclo Rankine, cada um alterando as propriedades do fluido de trabalho (MORAN e SHAPIRO, 2013).

Processo 4-1: Primeiro, o fluido de trabalho é bombeado (idealmente numa forma adiabática reversível) de uma pressão baixa para uma pressão alta utilizando-se uma bomba. O bombeamento requer algum tipo de energia para se realizar.

Processo 1-2: O fluido pressurizado entra numa caldeira, onde é aquecido à pressão constante até se tornar vapor superaquecido. Fontes comuns de calor incluem carvão, gás natural e energia nuclear.

Processo 2-3: O vapor superaquecido expande através de uma turbina para gerar trabalho. Idealmente, esta expansão é adiabática reversível. Com esta expansão, tanto a pressão quanto a temperatura se reduzem.

Processo 3-4: O vapor então entra num condensador, onde ele é resfriado, idealmente a pressão constante, até a condição de líquido saturado. Este líquido então retorna à bomba e o ciclo se repete.

Na figura 4 é mostrado o diagrama temperatura x entropia do ciclo Rankine e como se alteram ao longo de suas etapas:

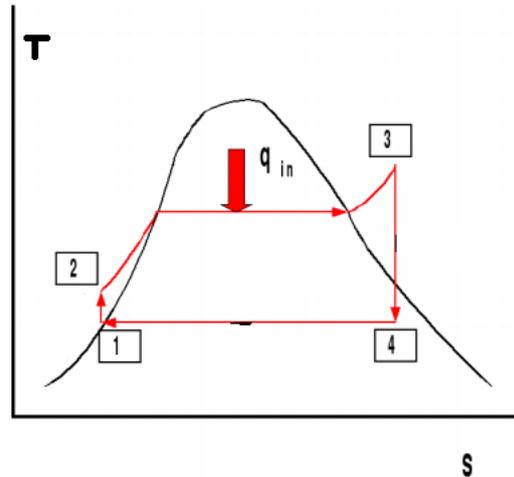


Figura 5 Diagrama Txs

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Cada uma das equações a seguir pode ser obtida facilmente a partir do balanço de massa e energia no volume de controle. A quinta equação define a eficiência termodinâmica do ciclo como sendo a razão entre o trabalho líquido do sistema e o calor fornecido ao sistema. A bomba normalmente exige aproximadamente 1% do trabalho da produção da turbina (MORAN & SHAPIRO, 2002). A figura 6 mostra o esquema do ciclo Rankine com seus respectivos equipamentos.

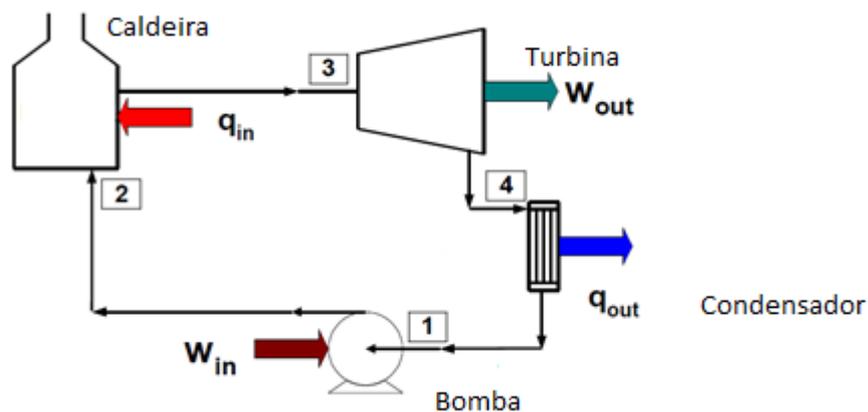


Figura 6 Esquema do ciclo Rankine.

Fonte: Moran e Shapiro (2002)

Segue abaixo o equacionamento das etapas do ciclo Rankine, considerando as seguintes hipóteses:

- Regime permanente em todos os componentes;

- Energia potencial desprezível;
- Em geral, energia cinética desprezível;
- Perdas de pressão na caldeira e no condensador são desprezíveis;
- Bombas e turbinas são consideradas isentrópicas;

Considerando a primeira lei da termodinâmica em regime permanente:

$$q + h_e = h_s + W \quad (2.11)$$

Em que:

q - é a quantidade de calor (kJ/kg);

W - trabalho por unidade de massa (kJ/Kg);

h_e - entalpia de entrada (kJ/kg);

h_s - entalpia de saída (kJ/kg);

Podemos aplicar a primeira lei da termodinâmica para todos os volumes de controle e serão encontrados os seguintes resultados:

Para caldeira:

$$\frac{\dot{Q}_{caldeira}}{\dot{m}} = h_2 - h_1; \quad (2.12)$$

Para turbina:

$$\frac{W_{turbina}}{\dot{m}} = h_2 - h_3 \quad (2.13)$$

Para o condensador:

$$\frac{\dot{Q}_{condensador}}{\dot{m}} = h_3 - h_4 \quad (2.14)$$

Para bomba:

$$\frac{W_{bomba}}{\dot{m}} = v(P_2 - P_1) \quad (2.15)$$

A eficiência do ciclo é definida como:

$$\eta = \frac{W_{turbina} - W_{bomba}}{Q_{caldeira}} \quad (2.16)$$

2.4 Dutos e tubulações

Tubos são condutos fechados destinados ao transporte de fluidos em geral. Normalmente são projetados para trabalhar em sessão plena. Tubulação é o conjunto de tubos mais os seus acessórios (Telles, 1982).

2.4.1 Principais materiais para fabricação de tubos

São empregados atualmente uma variedade muito grande de materiais para fabricação de tubos. Só a A.S.T.M (“*American Society for Testing and Materials*”) especifica mais de 500 tipos diferentes de materiais. Na figura 7 tem-se um esquema com os principais grupos de materiais para tubulações industriais.



Figura 7 Esquema com os principais materiais de tubulação.

Fonte: Telles (1982) - Adaptado

A escolha do material adequado será dada pelo tipo de tubulação que está sendo projetada, pelo fluido que será transportado e as condições de temperatura e pressão no qual estará submetido (TELLES, 1982).

2.4.2 Empregos das tubulações Industriais

Segundo Telles (1982) existe uma enorme variedade de emprego para tubulações na indústria em geral. Podemos separar as principais da seguinte forma, como mostra a figura 8.

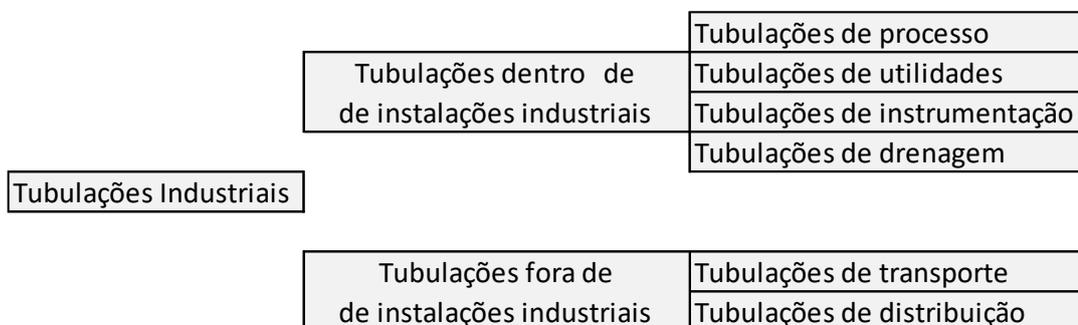


Figura 8 Esquema dos principais tipos de tubulação.

Fonte: Telles (1982).

As tubulações também podem ser classificadas quanto ao fluido conduzido, sendo que as principais são:

- Tubulações para água;
- Tubulações para vapor;
- Tubulações para óleo;
- Tubulações para ar;
- Tubulações para Gases;
- Tubulações para esgotos e drenagem.

2.4.3 Seleção de materiais para tubulação

Segundo Telles (1982) a seleção e especificação dos materiais adequados para cada serviço é um dos principais problemas enfrentados nas indústrias. Serão apresentados abaixo, os principais fatores que influenciam a seleção de um material de tubulação; em alguns casos entretanto, poderão haver outros fatores determinantes na seleção. Os fatores podem ser conflitantes entre si; por exemplo, o material com melhor resistência à corrosão pode ser muito caro e de difícil obtenção, e vice-versa. Por esse motivo, a relação não possui nenhum tipo de prioridade.

- Condições de serviço (pressão e temperatura de trabalho): o material deve ser capaz de resistir à pressão e também toda a faixa de variações possíveis de temperatura. Devem ser

obrigatoriamente consideradas as condições externas, tanto máximas quanto mínimas, ainda que esses valores extremos só ocorram em situações transitórias ou eventuais.

- Fluido conduzido: devem ser considerados os seguintes aspectos do fluido: Natureza e concentração, impureza e contaminantes, existência ou não de gases dissolvidos ou de sólidos em suspensão, temperatura, pH, ataque corrosivo aos materiais, possibilidade de contaminação, etc.

- Nível de tensões no material: o material deve resistir aos esforços solicitantes, e por isso a sua resistência mecânica deve ser compatível com o nível de tensões.

- Natureza dos esforços mecânicos: independente do nível de tensões, a natureza dos esforços existentes (tração, compressão, flexão, vibrações, etc), também condiciona a escolha do material.

- Diâmetro do tubo: conforme o diâmetro, um ou outro material poderá ser escolhido para o mesmo serviço, dependendo das linhas de fabricação comercial dos tubos.

- Sistema de ligações: o material deverá ser adequado ao sistema de ligações que se deseja empregar. O sistema de ligações, por sua vez, dependerá da necessidade ou não de desmontagem.

- Custo do material: deve-se realizar uma análise de viabilidade econômica em um projeto.

- Segurança: o material deve ser selecionado de forma que não ofereça risco potencial a integridade da tubulação ou das pessoas ao redor do local.

- Velocidade do fluido: para alguns materiais a velocidade do fluido interfere diretamente na corrosão.

- Perdas de carga: quando por exigência de serviço, um limite de perda de carga é imposto o material deverá possuir baixo coeficiente de atrito, afim de atender essa exigência.

- Tempo de vida: o tempo de duração máxima do material tem de ser compatível com o tempo de vida da tubulação.

2.4.4 Tubulação para vapor

Segundo Telles (1982) o vapor é um fluido pouco corrosivo, para qual diversos materiais podem ser empregados até sua temperatura limite de resistência mecânica aceitável. Para pressões muito altas de vapor (acima de 40 kg/cm^2), convém que sejam adotados limites de temperaturas mais baixos.

Em quaisquer tubulações para vapor é muito importante a perfeita e completa drenagem do condensado formado, por meio de purgadores. Para auxiliar a drenagem é feita a instalação de tubos com um pequeno caimento constante na direção do fluxo, principalmente em linhas de vapor saturado. A tabela 1 contém os principais materiais de tubulação a vapor e suas respectivas situações de atuação.

Fonte: Telles (1982)

Temperatura máxima do vapor (°C)	Tubos			
	Diametro (pol)	Material ASTM ou API	Ligações	Espaço para corrosão
120	até 4 "	Aço carbono A-120 Aço-carbono galvanizado	solda rosca	1,2
200	até 2 "	Aço carbono A-53 Latão, cobre , alumínio	solda/rosca	1,2
380	todos	Aço carbono A-53 A-672 Gr A-55	solda	1,2
420	todos	Aço carbono acalmado (Si) - A-106 ou A-672 Gr	solda	1,2
450	todos	Aço-liga 1/2 Mo A-335 Gr P1 ou A-672 Gr CM-65,70	solda	1,2
470	todos	Aço-liga 1/4 Cr -1/2 Mo A-335 Gr-P11 ou A-691 Gr 1/4 Cr	solda	1,2
480	todos	Aço-liga 1/4 Cr -1/2 Mo A-335 Gr-P11 ou A-691 Gr 1/4 Cr	solda	1,2
550	todos	Aço inoxidável tipo 304	solda	1,2

Tabela 1 - Especificações de tubulações e seus materiais

2.4.5 Tubulação para usinas termelétricas

Como mostrado anteriormente, no ciclo de geração termelétrica, mais especificamente no processo 1-2, ocorre a transformação do líquido em vapor super-aquecido e o mesmo é transportado para uma turbina. Nesse trecho do percurso, existe uma tubulação, que deve atender os mesmos requisitos de uma tubulação de vapor comum, ou seja, transportar grandes volumes de vapor com a menor queda de pressão e temperatura ao longo do seu comprimento. Os tubos de usinas termelétricas possuem entre 240 e 550 mm para as linhas de vapor, a espessura pode chegar a 65 mm (LORA e NASCIMENTO, 2004).

Para plantas mais velhas, com pressão e temperaturas mais baixas, os materiais adotados para os tubos são aço C-Mn com 0,5% de Mo (fora de uso) e 1% de Cr-0,5 Mo. Para as plantas convencionais os usos recentes tem sido o aço 0,5 Cr-0,5 Mo-0,25 V ou o aço 2,25 Cr-1 Mo. Aços inoxidáveis austeníticos do tipo 316 são usados em unidades supercríticas e ocasionalmente o tipo 347 em plantas convencionais (LORA e NASCIMENTO, 2004).

2.5 Isolantes para tubulação a vapor

Segundo Telles (1982), a seleção do isolamento para tubulações deve se analisar o tipo de linha da tubulação, essas que podem ser quentes ou frias. Os critérios podem ser vistos no esquema da figura 9:

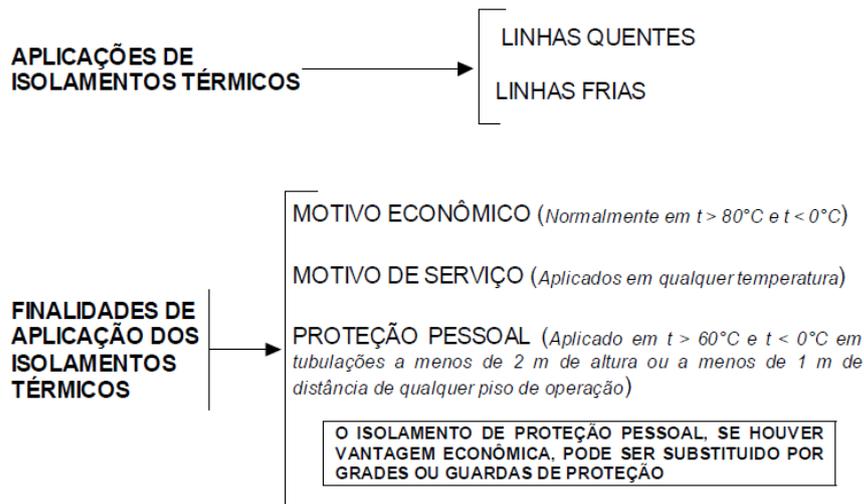


Figura 9 esquema de seleção para isolamentos de tubulações.

Fonte: Telles (1982)

A 10 apresentada abaixo mostra os principais materiais escolhidos para isolamentos industriais e suas respectivas aplicações:

Material	Limite de Temp. °C	Resistência à			Condutividade Térmica Média BTU (h°F pé ² /poi)				
		Água ou Umidade	Fogo	Danos Mecânicos	a 40°C	a 100°C	a 200°C	a 300°C	a 400°C
<i>Isolantes térmicos rígidos</i>									
<i>Materiais em forma de calha ou segmentos pré-moldados</i>									
Hidrossilicato de Ca	até 1000	Boa	Boa	Fraca à tração	0,38	0,40	0,47	0,57	
Composição de Mg 85%	até 320	Fraca	Boa	Fraca à tração	0,40	0,43	0,51	0,59	
Lã mineral (Lã de rocha)	até 900	Boa	Excelente	Fraca	0,32	0,37	0,50	0,64	0,77
Silica diatomácea (Terra diatomácea)	até 1000	Fraca	Regular	Fraca	0,58	0,60	0,68	0,78	0,86
Lã de vidro	-180 a 540	Excelente	Excelente	Fraca	0,25	0,28	0,30		
Espuma de plástico (poliestireno expan.)	-50 a 80	Excelente	Não resiste	Regular	0,40				
Cortiça	-50 a 80	Boa	Não resiste	Regular	0,25	0,26			
<i>Isolantes térmicos flexíveis</i>									
<i>Materiais em forma de mantas (tecidos)</i>									
Amianto	até 400	Boa	Excelente	Regular	0,47	0,50	0,57	0,65	
Lã de vidro	Como acima								
Lã mineral	Como acima								
<i>Materiais aplicados por "spray"</i>									
Poliuretanos	-240 a 100	Boa	Não resiste	Regular	0,14				

Figura 10 Tabela de isolamentos.

Fonte: Telles (1982).

3 METODOLOGIA

No presente capítulo descreve-se a característica do desenvolvimento da pesquisa, com o objetivo de determinar a sua natureza e classificação, a área da pesquisa, método e instrumentos de coleta utilizados assim como as variáveis e indicadores adotados, para que possam ser feitas as análises e cálculos necessários.

3.1 Tipos de pesquisa

Segundo Gil (1999), a pesquisa tem um caráter pragmático, é uma maneira formal e sistemática de desenvolvimento do método científico. O objetivo fundamental da pesquisa é encontrar soluções para um problema, mediante o uso de procedimentos científicos.

De acordo com Minayo (2003), existem duas formas de realizar uma pesquisa, a qualitativa e a quantitativa. O método qualitativo é baseado na interpretação, o qual ocupa um lugar central na teoria e é constituído por um conjunto de técnicas que serão adotadas para construir uma realidade. Explorando as características e cenários que não podem ser facilmente descritos numericamente. Os dados são coletados pela observação, descrição e gravação.

Já a pesquisa quantitativa, para Silva (2004), é todo o tipo de informação que pode ser traduzida em números utilizando métodos estatísticos, as opiniões e dados obtidos de acordo com os boletins de informação e pesquisa de campo.

O presente trabalho se classifica quanto à abordagem de pesquisa, em uma pesquisa quantitativa, pois utiliza de dados numéricos e cálculos.

Com relação ao objetivo da pesquisa, Gil (1999) classifica a pesquisa como exploratória, na qual sua finalidade é esclarecer, desenvolver e modificar ideias e conceitos, tendo em vista, hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores, envolvendo levantamento bibliográfico, documental, entrevistas e estudos de caso. E ainda proporcionar uma visão geral, aproximada acerca de determinado fato; descritiva, em que se observa, analisa, e descreve as características de determinada população ou fenômeno ou estabelece relações entre variáveis, tendo como principal técnica, a coleta de dados; e explicativa, que identifica os fatores que contribuem ou determinam a ocorrência dos fenômenos, de modo a aprofundar o conhecimento da realidade, pois explica a razão e o porquê das coisas.

Quanto ao objetivo da pesquisa, este trabalho consiste em uma pesquisa exploratória, devido ao fato de que irá se analisar os efeitos da perda de calor nas tubulações de termelétricas para diferentes materiais de tubulação, analisando o impacto na produção de energia elétrica.

Quanto aos procedimentos técnicos tem-se a pesquisa bibliográfica, a experimental, documental, pesquisa-ação, e estudo de caso (GIL, 1999).

Segundo Silva (2004), a pesquisa bibliográfica baseia-se na utilização de livros e obras acadêmicas, sejam estas impressas ou digitalizadas e obtidas via Internet, e também por meio de dados que se obtém através de estudo de casos e experimentos.

De acordo com Minayo (2003), a pesquisa experimental, está mais próxima às Ciências Naturais, sendo a grande responsável pelos maiores avanços científicos, por meio da manipulação de variáveis controladas adequadamente com o intuito de observar, examinar e interpretar as alterações e reações ocorridas em seu objeto de pesquisa, utilizando técnicas especiais, e equipamentos adequados.

Fonseca (2002) especifica pesquisa documental como sendo elaborada pelas mais diversas fontes, sem tratamentos analíticos. Ainda segundo o mesmo autor, a pesquisa participante caracteriza-se pelo envolvimento e identificação do pesquisador com as pessoas investigadas.

Já a pesquisa-ação, para Gil (1999), é realizada e concebida a partir de bases empíricas em estreita associação com uma ação ou resolução de um problema no qual os pesquisadores e participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo.

Segundo Yin (2001), estudo de caso envolve um estudo minucioso e exaustivo de um ou mais objetos de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento, com a lógica do planejamento, da coleta e da análise de dados. Para Gil (1999), os exemplos mais característicos desse tipo de pesquisa são os de investigações sobre ideologias ou aquelas que se propõem à análise das diversas posições acerca de um problema.

O presente trabalho abrange uma pesquisa de caráter bibliográfico, visto que é fundamentada em uma variedade de livros e internet, com o objetivo de enriquecimento teórico para realização do estudo proposto.

3.2 Materiais e Métodos

Para o presente trabalho foi necessário um estudo bibliográfico a fim de apresentar o equacionamento e a modelagem dos principais elementos do ciclo analisado, além de descrever e detalhar os principais componente de um ciclo de geração à vapor: bomba, condensador, turbina e caldeira.

A partir do estudo, foi elaborado um modelo matemático, utilizando as equações descritas nas seções 2.1 e 2.3 da revisão bibliográfica, e serão processados e tabulados no software EXCEL. Os dados fornecidos foram interpretados e discutidos. Ao final, as conclusões do autor foram apresentadas. A sequência de ações podem ser visualizadas na figura 11

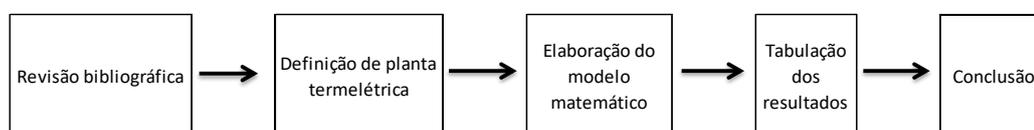


Figura 11 Fluxograma de sequência das ações presentes no trabalho

Na revisão bibliográfica apresentada no capítulo 2, foram mostrados conceitos de transferência de calor, ciclo de Rankine, tubulações de vapor e isolamentos. Na definição da planta termelétrica, foi adotada uma planta com o ciclo de Rankine simples, como mostrado no item 4.1. Na elaboração do modelo matemático mostrado no item 4.2, é mostrado um tubo, onde foi calculado inicialmente a perda de calor pela convecção interna, depois a perda de calor por condução na parede do tudo e do isolamento, e por último, a perda de calor por radiação e convecção natural com o ambiente externo, também foi considerada perda de carga ao longo do tubo para efeitos da variação da entalpia. Na etapa de tabulação dos resultados, é mostrada a entalpia, temperatura e pressão de todos os pontos do ciclo definido no item 4.1.

3.3 Instrumento de coleta de dados

Nesta etapa acontece a coleta de dados em cima do tema abordado a fim de obter o embasamento necessário para a pesquisa por meio de revisões bibliográficas, observações e experimentos.

Como já mencionado, esta pesquisa é de natureza bibliográfica, quantitativa e exploratória, logo todos os dados necessários para o estudos serão adquiridos por meio de uma pesquisa bibliográfica, utilizando livros, teses, dissertações, artigos e catálogos.

3.4 Variáveis e indicadores

Segundo Gil (1999) pode-se dizer que variável é qualquer coisa que pode ser classificada em duas ou mais categorias. É uma medida ou classificação, uma quantidade que varia, um conceito operacional que apresenta ou contém valores, propriedade, aspecto ou fator, identificado em um objeto de estudo e passível de verificação.

Para o estudo e medição de cada variável, existem alguns indicadores que são selecionados de acordo com os objetivos da pesquisa, sendo classificados de forma qualitativa ou quantitativa. Referente às definições apresentadas e os objetivos do trabalho, são separadas as variáveis e indicadores, como na tabela 2:

Tabela 3.1 - Tabela de indicadores e variáveis

Variáveis	Indicadores
Ciclo Rankine	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de entrada na caldeira • Temperatura de saída na caldeira • Temperatura de entrada na turbina • Potência gerada • Eficiência do ciclo
Tubulação entre a caldeira e a turbina	<ul style="list-style-type: none"> • Perda de calor na tubulação • Coeficiente de transferência de calor • Isolamento: material e espessura • Material da tubulação • Perda de pressão na tubulação

Fonte: Pesquisa direta (2018)

3.5 Tabulação de dados

A partir dos dados obtidos pela teoria, foram realizados cálculos no software EXCEL, que permite maior facilidade na resolução dos cálculos, melhor visualização dos dados, e simulação do ciclo proposto neste trabalho. O EXCEL será utilizado para realizar os cálculos e gerar tabelas e gráficos características do ciclo Rankine, da perda de calor na tubulação e do seu efeito na eficiência do ciclo, facilitando assim o entendimento e interpretação dos resultados.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foram mostradas as classificações referentes ao tipo de pesquisa, apresentando as ferramentas e técnicas utilizadas de forma a executar este trabalho. Abordaram-se também todos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento efetivo da pesquisa. Além de ter delimitado a área em que ocorre esta pesquisa e também a forma como foi realizada a coleta e tabulação dos dados obtidos.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos no estudo de caso, de acordo com a modelagem matemática realizada software EXCEL, e com as tabelas geradas também pelo EXCEL, além de mostrar quais foram os procedimentos adotados para a realização dos cálculos necessários e por fim será feita uma discussão dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para realizar os cálculos de perda de temperatura ao longo da tubulação que leva o vapor da caldeira à turbina, e conseqüentemente a eficiência energética do ciclo, são necessários alguns dados: temperatura do vapor na saída da caldeira (T_1), diâmetro da tubulação (d), temperatura do ambiente externo (T_∞), material do tubo, que caracteriza a condutividade térmica “ k ” e o comprimento da tubulação.

4.1 Considerações iniciais

Uma configuração típica da instalação à vapor, utilizado nesse trabalho é mostrada na figura 12.

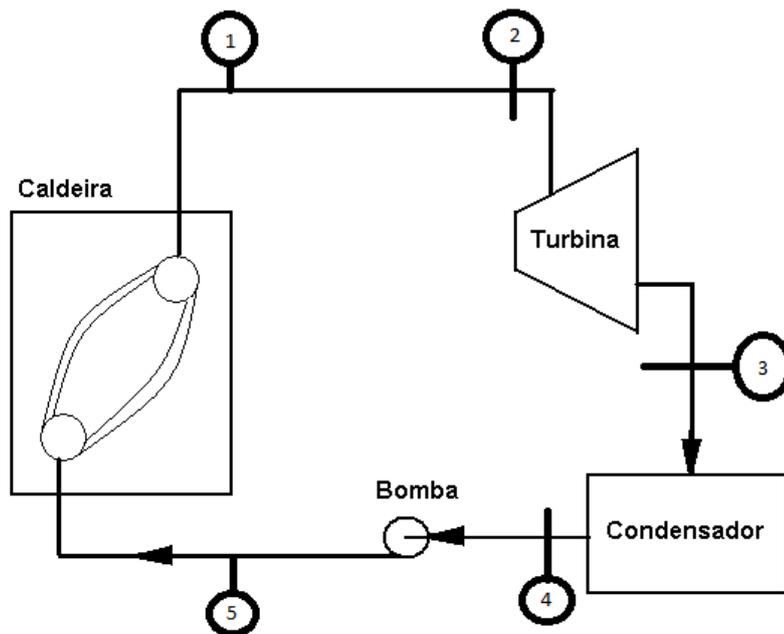


Figura 12 Representação do ciclo adotado.

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Os valores considerados para a instalação à vapor são:

$P_1 = 85 \text{ bar (8500 kPa)}$: pressão na saída da caldeira;

$T_1 = 400^\circ\text{C}$: temperatura na saída da caldeira;

$\dot{m} = 333,333 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$: vazão mássica de vapor;

$P_t = 10 \text{ kPa}$: pressão de trabalho do condensador;

$T_\infty = 25^\circ\text{C}$: temperatura do ambiente externo;

4.1.2 Cálculo do diâmetro da tubulação

Segundo Pera (1990) a velocidade de escoamento em tubulações de vapor d'água deve variar de 35 a 60 m/s. Nesse estudo considerou-se a velocidade de 35 m/s para definição do diâmetro da tubulação.

Adotou-se um comprimento de 13 metros e os seguintes dados de cálculo:

\dot{m} = vazão mássica da tubulação = 333,333 kg/s;

V = volume específico (tabelado) = 0,032125 m³/kg;

v = velocidade de escoamento (convenção) = 35 m/s;

Assim, o diâmetro da tubulação que liga a caldeira à turbina será:

$$d = \sqrt{\frac{4 \dot{m}_s}{\pi v} V} = 624,72 \text{ mm}$$

Utilizando o catálogo da Açotubo mostrado na figura 13 pode-se verificar o diâmetro próximo ao calculado.

Norm. pol. (")	Diâmetro		Esp. Parede mm	Peso Kg/m	Denom. Conf. API 5L	Sched Nº
	Ext. mm	Int. mm				
24"	610,0	597,30	6,35	94,53	-	10
		590,96	9,52	140,97	STD	20
		584,60	12,70	187,06	XS	-
		581,46	14,27	209,64	-	30
		575,04	17,48	255,41	-	40
		560,78	24,61	355,26	-	60
		548,08	30,96	442,08	-	80
		532,22	38,89	547,71	-	100
		517,96	46,02	640,03	-	120
		505,26	52,37	720,15	-	140

Figura 13 Catálogo Açotubo.

Fonte: Catálogo açotubo - 2016

Para este trabalho o diâmetro adotado foi o 581,46 mm. Realizando novamente o cálculo da velocidade determinou-se o novo valor de 40,31 m/s.

4.2 Cálculo da perda de calor por convecção interna do tubo

Na figura 14 é apresentada a tubulação utilizada no ciclo definido.

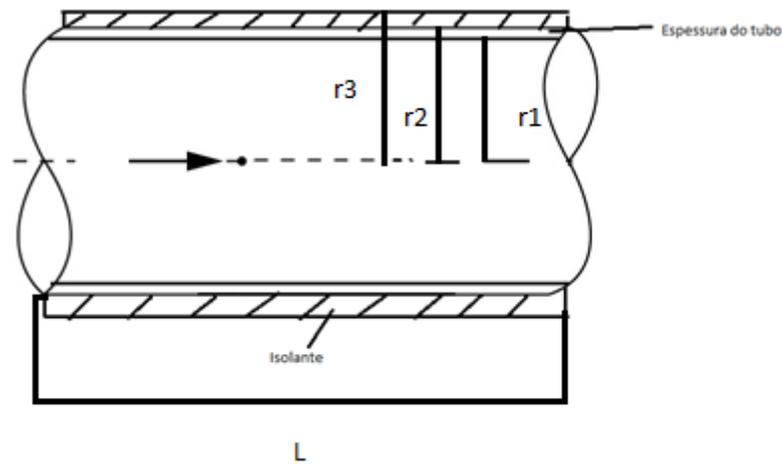


Figura 14 Configuração do tubo.

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Na figura 14 o r_3 é o raio que liga o centro do tubo até a borda do isolamento, o raio r_2 liga até o raio externo do duto, o raio r_1 o centro do tubo até a borda interna e L é o comprimento da tubulação.

Na figura 15, é mostrado o esquema de resistências térmicas da seção transversal da tubulação.

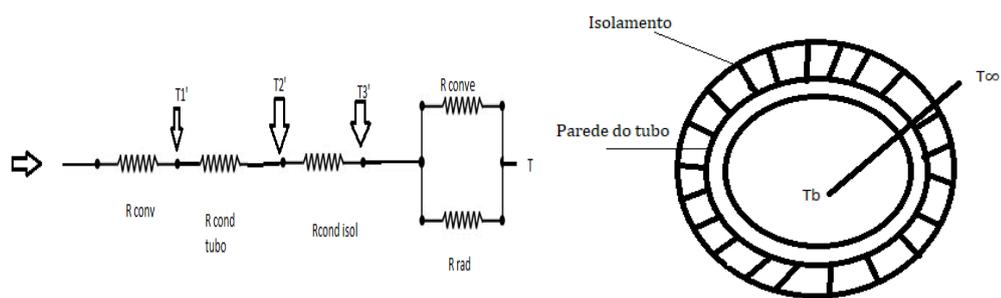


Figura 15 Representação das resistências ao longo do tubo.

Fonte: Pesquisa direta (2019)

A equação da conservação de energia para escoamento permanente em um tubo pode ser escrita como:

$$q_r = c_p \cdot \dot{m} (T_{in} - T_{out}) \quad (4.1)$$

Como no problema proposto não é conhecida a temperatura de saída do fluido, foi utilizado o método iterativo, com o auxílio do software Excel, para concluir a temperatura de saída, e conseqüentemente a temperatura de filme a partir de uma temperatura de saída inicialmente arbitrária:

$$T_f = \frac{T_{in} - T_{out}}{2} \quad (4.2)$$

T_f – temperatura média do escoamento (K);

T_{in} – temperatura de entrada (K);

T_{out} – temperatura de saída (K);

A equação 4.1 determina o calor perdido no comprimento da tubulação, relacionando as temperaturas de entrada e saída do fluido.

Observa-se que esta taxa de calor será transferida ao ambiente externo através da configuração da figura 13 e que pode ser calculada pela equação:

$$q = \frac{\Delta T}{R_{conv}} \quad (4.3)$$

Onde temos a resistência total sendo um somatório de todas resistências, uma vez que se encontram em série:

$$R_{tot} = R_{convi} + R_{condtu} + R_{condiso} + R_{eq}$$

a R_{eq} são as resistências de convecção natural em paralelo com a resistência por radiação:

$$R_{eq} = \frac{R_{rad} * R_{conve}}{R_{rad} + R_{conve}}$$

Também pode-se escrever para a configuração da figura 15:

$$q = q_{conv} = q_{cond tubo} = q_{cond isol} = q_{conv,rad}$$

A resistência convectiva pode ser dada por:

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{out} 2\pi r_1 * L} \quad (4.4)$$

Para o cálculo da perda de calor por convecção entre o fluido e as paredes da tubulação, será utilizada a correlação de Dittus-Boelter:

$$Nu = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^n \quad (4.5)$$

$$h = \frac{k_w}{D_h} Nu \quad (4.6)$$

h = coeficiente de transferência de calor por convecção;

k_w = condutividade do fluido;

D_h = diâmetro hidráulico;

Nu = número de nusselt;

Pr = Número de Prandtl;

Re = Número de Reynolds;

$$\Delta T = T_f - \bar{T}_i \quad (4.7)$$

A condução no tubo pode ser dada pela seguinte equação:

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi * k_t * L} \quad (4.8)$$

A taxa de calor no tubo, pode ser mostrada pela equação 4.9

$$q_{tubo} = \frac{\Delta T_{tubo}}{R_{cond}} \quad (4.9)$$

A temperatura média no tubo, pode ser encontrada a partir da relação:

$$\bar{T}_i = \bar{T}_{i1} - \Delta T_{tubo} \quad (4.10)$$

Analogamente à condução no tubo, a condução no isolante pode ser encontrada pelas equações 4.11, 4.12 e 4.13.

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi * k_{iso} * L} \quad (4.11)$$

$$q_{tubo} = \frac{\Delta T_{iso}}{R_{condiso}} \quad (4.12)$$

$$\bar{T}_w = \bar{T}_{i2} - \Delta T_{iso} \quad (4.13)$$

O cálculo da resistência por radiação é dado pela equação 4.14.

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} 2\pi * r_3 * L} \quad (4.14)$$

O coeficiente de transferência de calor por radiação, pode ser encontrado a partir da relação 4.15:

$$h_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma (\bar{T}_w^2 + T_{viz}^2) (\bar{T}_w - T_{viz}) \quad (4.15)$$

Cálculo da convecção externa

Para essa situação, será considerada a convecção natural.

A equação 4.16, mostra o cálculo da temperatura de filme:

$$T_{fe} = \frac{T_{\infty} + \bar{T}_w}{2} \quad (4.16)$$

O número de Railegh é dado por:

$$R_{ad} = \frac{g \cdot \beta \cdot (\bar{T}_w - T_{\infty}) D_{iso}^3 \cdot Pr}{\nu^2} \quad (4.17)$$

Em que o coeficiente β , pode ser encontrado a partir da equação 4.18:

$$\beta = \frac{1}{T_{fe}} \quad (4.18)$$

O número de Nusselt para convecção externa, é dado a partir da equação 4.19:

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 \cdot R_{ad}^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{1}{4}}} \right\}^2 \quad (4.19)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção é encontrado a partir da relação abaixo:

$$h_e = \frac{k_{ar} \cdot Nu}{2r_3} \quad (4.20)$$

A resistência convectiva é calculada a partir da equação 4.21:

$$R_{conve} = \frac{1}{h_e \cdot 2\pi \cdot r_{iso} \cdot L} \quad (4.21)$$

Com isso, encontramos a resistência total:

$$R_{tot} = R_{convi} + R_{condtu} + R_{condiso} + R_{eq} \quad (4.23)$$

Calor total dissipado:

$$q_{est} = \frac{\Delta T}{R_{tot}} \quad (4.24)$$

4.3 Cálculo da perda de pressão na tubulação

Segundo Teles (1982), a perda de carga em tubulações de vapor pode ser dada pela equação:

$$\Delta P = 0,0000000367 \left(1 + \frac{3,6}{d} \right) \frac{Q^2 \cdot L}{p \cdot d^5} \quad (4.25)$$

ΔP – perda de pressão ao longo da tubulação (kPa);

d – diâmetro interno da tubulação (m);

L – comprimento da tubulação (m);

p – peso de um metro cúbico de vapor nas condições de escoamento (kg);

Q – vazão de vapor (kg/s);

A pressão na saída da tubulação, e entrada da turbina, será:

$$P_2 = P_1 - \Delta P \quad (4.26)$$

4.4 Cálculo da eficiência térmica do ciclo

A eficiência do ciclo a vapor é determinada através da equação:

$$\eta = \frac{W_{turbina} - W_{bomba}}{Q_{caldeira}} \quad (4.27)$$

Cálculo do título:

$$x = \frac{s_3 - s_l}{s_{lv}} \quad (4.28)$$

Cálculo da entalpia pós turbina:

$$h_3 = h_l + x * (h_{lv}) \quad (4.29)$$

Trabalho da bomba:

$$W_{bomba} = v(P_5 - P_4) \quad (4.30)$$

4.5 Cálculos realizados

Para realizar as análises necessárias foram criados 15 tipos de combinações diferentes de material do tubo e isolamento, com diferentes espessuras de isolamento. Os materiais adotados foram Aço-carbono acalmado (Si) A-106, Aço-liga A-335 Gr P11 e Aço Inoxidável 304, pois segundo Teles (2000), esses são os materiais mais comuns para faixa de temperatura adotada no problema, além de possuírem características mecânicas diversas e no caso do Aço Inoxidável 304, possui resistência à corrosão. Os isolamentos escolhidos para cálculo foram Fibra cerâmica e lã de vidro, pois são os mais acessíveis ao mercado, e as espessuras adotadas foram 50 e 100 mm, além disso também foram feitos os cálculos sem nenhum isolamento. A tabela abaixo 4.1 com as combinações definidas é mostrada abaixo.

Tabela 2 – Combinações calculadas.

Combinação	Material	Isolamento	Espessura do isolamento (mm)
1	Aço-carbono acalmado (Si) A-106	Fibra cerâmica	50
2	Aço-carbono acalmado (Si) A-106	Fibra cerâmica	100
3	Aço-carbono acalmado (Si) A-106	Lã de vidro	50
4	Aço-carbono acalmado (Si) A-106	Lã de vidro	100
5	Aço-liga A-335 Gr P11	Fibra cerâmica	50
6	Aço-liga A-335 Gr P11	Fibra cerâmica	100
7	Aço-liga A-335 Gr P11	Lã de vidro	50
8	Aço-liga A-335 Gr P11	Lã de vidro	100
9	Aço Inoxidável 304	Fibra cerâmica	50
10	Aço Inoxidável 304	Fibra cerâmica	100
11	Aço Inoxidável 304	Lã de vidro	50
12	Aço Inoxidável 304	Lã de vidro	100
13	Aço-carbono acalmado (Si) A-106	Nenhum	0
14	Aço-liga A-335 Gr P11	Nenhum	0
15	Aço Inoxidável 304	Nenhum	0

Fonte: Pesquisa direta (2019)

A tabela 3 apresentada abaixo apresenta os resultados obtidos até o ponto 3 da figura 12:

Tabela 3 – Resultados obtidos até o ponto 3.

Comb.	P1 (kPa)	T1 (°C)	H1 (KJ/Kg)	P2 (kPa)	T2 (°C)	H2 (KJ/Kg)	P3 (kPa)	T3 (°C)	H3 (KJ/Kg)
1	8500	400	3128	8499	381,2	3072	10	45,79	1975,072
2	8500	400	3128	8499	387,22	3090	10	45,79	1983,684
3	8500	400	3128	8499	389,35	3097	10	45,79	1986,874
4	8500	400	3128	8499	393,55	3109	10	45,79	1992,615
5	8500	400	3128	8499	381,18	3072	10	45,79	1975,072
6	8500	400	3128	8499	387,2	3090	10	45,79	1983,684
7	8500	400	3128	8499	389,37	3097	10	45,79	1986,874
8	8500	400	3128	8499	393,5	3109	10	45,79	1992,615
9	8500	400	3128	8499	381,2	3072	10	45,79	1975,072
10	8500	400	3128	8499	387,2	3090	10	45,79	1983,684
11	8500	400	3128	8499	389,35	3097	10	45,79	1986,874
12	8500	400	3128	8499	393,55	3109	10	45,79	1992,615
13	8500	400	3128	8499	359,05	3002	10	45,79	1940,305
14	8500	400	3128	8499	359,1	3002	10	45,79	1939,986
15	8500	400	3128	8499	358,5	3000	10	45,79	1939,029

Fonte: Pesquisa direta (2019)

A tabela 4 apresenta os resultados das combinações até o ponto 5 do ciclo mostrado na figura 12:

Tabela 4 Resultados e eficiência.

Comb.	Título	P4 (kPa)	T4 (°C)	H4 (KJ/Kg)	P5 (kPa)	T5 (°C)	H5 (kJ/Kg)	Eficiência (%)
1	0,745	10	45,79	191,81	8500	46,07	200,27	24,07
2	0,749	10	45,79	191,81	8500	46,07	200,27	24,40
3	0,750	10	45,79	191,81	8500	46,07	200,27	24,53
4	0,753	10	45,79	191,81	8500	46,07	200,27	24,74
5	0,745	10	45,79	191,81	8500	46,07	200,27	24,07
6	0,749	10	45,79	191,81	8500	46,07	200,27	24,40
7	0,750	10	45,79	191,81	8500	46,07	200,27	24,53
8	0,753	10	45,79	191,81	8500	46,07	200,27	24,74
9	0,745	10	45,79	191,81	8500	46,07	200,27	24,07
10	0,749	10	45,79	191,81	8500	46,07	200,27	24,40
11	0,750	10	45,79	191,81	8500	46,07	200,27	24,53
12	0,753	10	45,79	191,81	8500	46,07	200,27	24,74
13	0,731	10	45,79	191,81	8500	46,07	200,27	22,87
14	0,730	10	45,79	191,81	8500	46,07	200,27	22,88
15	0,730	10	45,79	191,81	8500	46,07	200,27	22,85

Fonte: Pesquisa direta (2019)

A partir da análise da tabela podemos concluir que o fator mais importante nesse tipo de situação é o isolamento, pois as 5 melhores eficiências são de Poliuretano com 100 mm de espessura. As combinações 9 e 15, mesmo possuindo menor espessura de isolamento, por serem de poliuretano apresenta uma melhor eficiência que outros isolamentos de maior espessura. É possível observar também que uma construção sem nenhum isolamento possui uma grande perda de temperatura ao longo do tubo, numa distância curta (13 m), os casos sem isolamento perdem aproximadamente 40 °C.

O calor perdido para cada combinação é mostrado no gráfico 4.1 abaixo:

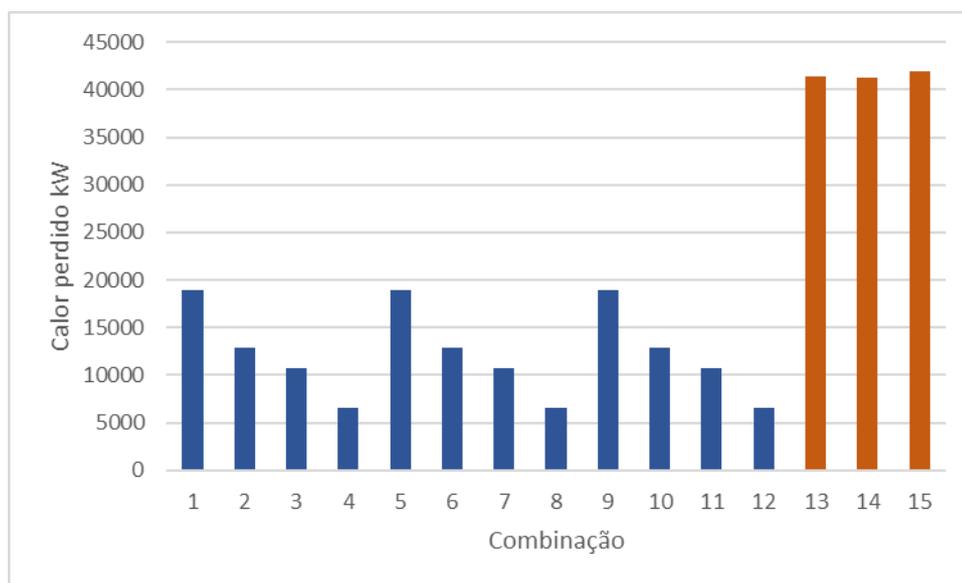


Gráfico 4.1 – calor perdido

Fonte: Pesquisa direta (2019)

No gráfico 4.1, podemos observar que quanto maior a condutividade térmica o isolamento e sua espessura, ocorre uma maior perda de calor do tubo. Para os tubos com isolamento observa-se que para a combinação 12, tem-se a menor perda de calor, e para a combinação 1, a maior perda. A diferença percentual dessas perdas é de 192 %. Nos casos sem isolamento, é mostrado uma perda de 212 % em relação a combinação 1, que possui maior perda dentre as com isolamento.

No gráfico 4.2 é mostrado a temperatura de entrada na turbina, pode-se observar que as combinações que possuem a maior temperatura na entrada da turbina, tem a menor perda de calor ao longo do tubo.

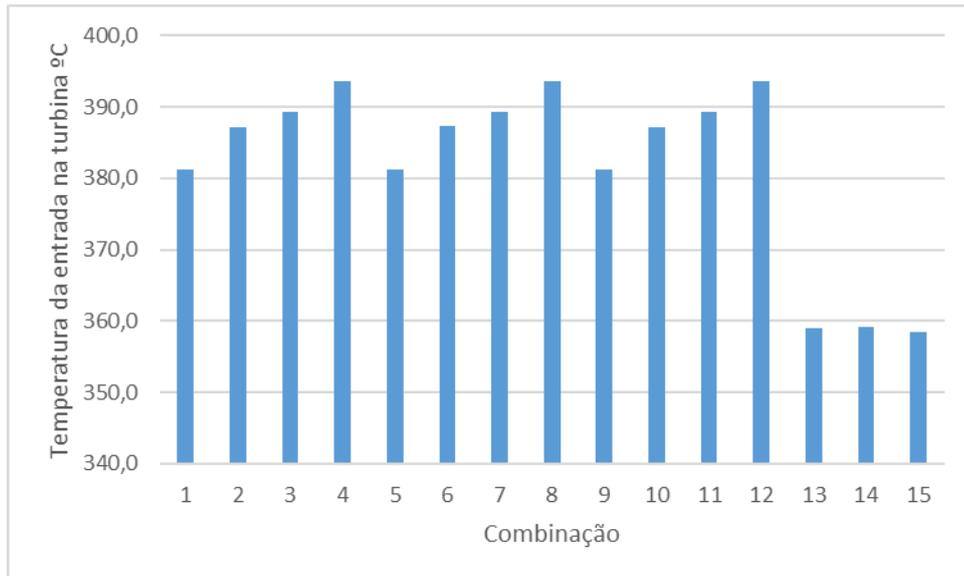


Gráfico 4.2 – temperatura na entrada da turbina

Fonte: Pesquisa direta (2019)

O gráfico 4.3 mostra a entalpia na entrada da turbina, é observado que o mesmo se assemelha qualitativamente ao gráfico de temperatura na entrada da turbina, pois a entalpia e temperatura são diretamente proporcionais, considerando que não há grande diferença de perda de carga na tubulação, o fator mais relevante para obtenção da entalpia é a temperatura.

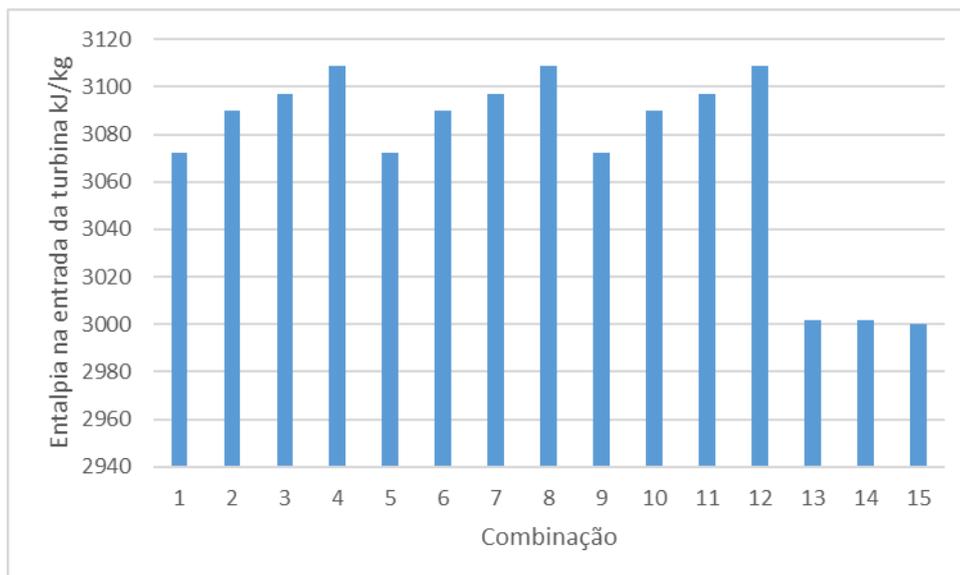


Gráfico 4.3 – entalpia na entrada da turbina

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Novamente os maiores valores de entalpia são para os maiores valores de temperatura, pois como os 3 materiais possuem rugosidade similar, a diferença de perda de carga entre os materiais é praticamente descartável, restando como único parâmetro para definição da entalpia a temperatura do fluido de trabalho.

O gráfico 4.4 indica a eficiência do ciclo a vapor para as diferentes combinações apresentadas, e podemos observar que as melhores eficiências térmicas estão com os isolamentos de menor condutividade térmica e maior espessura apresentando uma diferença de 0,66 % de eficiência entre o melhor e pior caso.

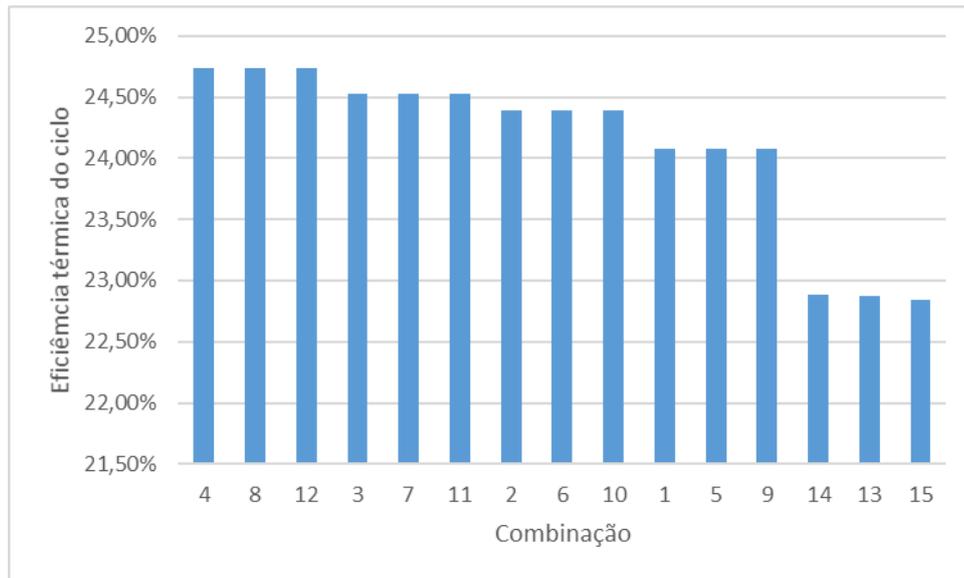


Gráfico 4.4 – eficiência do ciclo

Fonte: Pesquisa direta (2019)

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

Neste trabalho apresentou-se a análise da influência das perdas de calor e de pressão na tubulação que liga a caldeira à turbina a vapor, na eficiência térmica de um ciclo de Rankine simples. Utilizou-se combinações de 3 tipos diferentes de materiais de tubulação, 2 tipos diferentes de isolantes e 2 espessuras distintas dos mesmos. Realizando todas as combinações foi possível identificar diversas situações, além de ser possível constatar que não há grande relevância em termos de eficiência térmica na alteração pura e simples do material da tubulação. Os outros aspectos da seleção com ambiente a que está submetido ou o nível de tensões no local são muito mais relevantes para escolha do que a eficiência térmica.

Outra análise realizada foi a alteração do isolamento, que possui maior relevância na determinação da eficiência térmica, pois os melhores resultados são obtidos com o isolamento de lã de vidro em que mesmo o material da tubulação com maior condutividade térmica que é o aço-carbono acalmado A-106, possui desempenho térmico similar aos outros materiais de tubulação quando está combinado com lã de vidro, cerca de 24,74 %.

A terceira análise realizada foi a de alteração da espessura do isolamento, onde mostra-se que ao aumentar 5 cm na espessura do isolamento é possível reduzir para cerca de 60 % da perda calor na tubulação.

Podemos concluir que para evitar uma redução na eficiência térmica de uma central termelétrica, a seleção correta de materiais de isolamento é fator determinante.

5.2 Recomendações

Como sugestões de trabalhos posteriores o autor indica:

- Análise de custo das combinações desses materiais e seus isolamentos, comparando com a eficiência térmica, traçando uma curva para encontrar um ponto de otimização, entre custo e eficiência térmica.

- Simulação em diferentes ambientes, também alternando os materiais, simulando ambientes altamente corrosivos e também ambientes em que são necessários alta resistência a esforços mecânicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLUNDELL, K. S (2006). **Concepts in Modern Physics**. [S.l.: s.n.]
- CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – Fontes – 2016 -
https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes?_adf.ctrl-state=12kr2haq4f_1&_afLoop=1555077497941929#!%40%40%3F_afLoop%3D1555077497941929%26_adf.ctrl-state%3D12kr2haq4f_5 – acesso em 24/06/2019.
- ÇENGEL, Yunus A; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill 2007.
- COTTINGHAM, W.H.; GREENWOOD, D.A. (1986). **An introduction to nuclear physics**. Cambridge: Cambridge University Press. p. 107.
- EISBERG e RESNICK, Robert e Robert (1979). **Física Quântica**. [S.l.]: Elsevier.
- FONSECA, João José Saraiva Da. **Metodologia da pesquisa científica**. Apostila, UEC Fortaleza. 2002.
- GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.
- HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J., **Fundamentos de Física 2** - São Paulo: Livros Técnicos e Científicos Editora, 4a Edição, 1996.
- HOLMAN, J. P. **Transferência de Calor**: McGraw-Hill, 1983.
- INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. **Introdução a Transferência de Calor**: LTC, 2003.
- J.Ph. PERÉZ, A.M. ROMULUS. **Thermodynamique. Fondements et applications**, Masson, Paris, 1993. ISBN 2-225-84265-5
- LORA, Electo Eduardo Silva; NASCIMENTO, Marco Antônio Rosa do. **Geração termelétrica 1: planejamento, projeto e operação**. Rio de Janeiro: Interciência 2004. v.1
- LORA, Electo Eduardo Silva; NASCIMENTO, Marco Antônio Rosa do. **Geração termelétrica 2: planejamento, projeto e operação**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. v.2
- MATTOS, FALCO, Reinaldo de, Edson Ezequiel de. **Bombas Industriais** - 2a. ed. - Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
- MINAYO, M. C. S. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. 22 ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2003.

- MORAN & SHAPIRO. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 2013 7ed.
- PERA, Hildo, **Gerador de Vapor d'Água**, USP, São Paulo, *Editora Fama* 2º ed, 1990.
- RICHARDSON, ALEXANDER. **The Evolution of the Parsons Steam Turbine**. Cambridge University Press, 2014.
- SILVA, C. R. O. **Metodologia do trabalho científico**. Fortaleza: Centro Federal e Educação Tecnológica do Ceará, 2004.
- SOUZA / FUCHS / SANTOS – **Centrais Hidro e Termelétricas**. Ed. Edgar Blucher, São Paulo, 1977
- STOECKER, W. F., JABARDO, J. M. S. **Refrigeração Industrial**. 2. Ed. São Paulo.
- TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Tubulações industriais; materiais, projeto e desenho** – 6. Ed . ver. – Rio de Janeiro ; LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1982.
- VAN WYLEN, Gordon J; SONNTAG, Richard Edwin. **Fundamentals of classical thermodynamics**: 4th ed. New York: J. Wiley c1994.
- WILLIAMS et al. **Renewable Energy**,– Ed. Island Press, Washington, USA, 1992.
- WISER, Wendell H. **Energy Resources**, 2002
- YIN, R. K. Estudo de Caso: Planejamento e Métodos. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- YOUNG, H.D; FREEDMAN, R.A (2008). Física II: **Termodinâmica e Ondas**. 12 ed. São Paulo: Addison-Wesley.