



Faculdade de Engenharia

Departamento de Engenharia Química

Engenharia Química

Estágio profissional

**Avaliação das oportunidades de conservação e gerenciamento de energia em sistemas de geração e distribuição de Vapor**

**Estudo de caso: Tongaat-Hullett:Açucareira de Moçambique**

**Autor:** Tomás, António Miguel

**Supervisor:** Prof. Dr.Eng. Miguel Uamusse

Maputo, 2024



Faculdade de Engenharia

Departamento de engenharia Química

Engenharia Química

**Avaliação das oportunidades de conservação e gerenciamento de energia em sistemas de geração e distribuição de Vapor**

**Estudo de caso: Tongaat-Hullett:Açucareira de Moçambique**

**Autor:** Tomás, António Miguel

Trabalho de conclusão do curso apresentado ao departamento de Engenharia Química da Universidade Eduardo Mondlane, como requisito para obtenção do título de licenciado em Engenharia Química.

Supervisor: Prof. Dr.Eng. Miguel Uamusse

Maputo, 2024



Faculdade de Engenharia

Departamento de engenharia Química

Engenharia Química

**TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DO ESTÁGIO PROFISSIONAL**

Declaro que o estudante **António Miguel Tomás** entregou no dia \_\_\_\_/\_\_\_\_/2024 as \_\_\_\_ cópias do relatório do seu estágio profissional com a referência: \_\_\_\_ intitulado: **Avaliação das oportunidades de conservação e gerenciamento de energia em sistemas de geração e distribuição de Vapor. (Estudo de caso: Tongaat-Hullett:Açucareira de Moçambique)**

Maputo, \_\_\_\_ de \_\_\_\_ de 2024

A Chefe da Secretaria

---

## **DECLARAÇÃO DE HONRA**

Eu, António Miguel Tomás, declaro por minha honra que este relatório de estágio profissional é obra da minha autoria e que nunca foi apresentada ou publicada, parcialmente ou integralmente e nem aceite em alguma instituição para obtenção de qualquer grau académico e que constitui o resultado da minha investigação. Estudos de outras pessoas foram usados na compilação do presente trabalho e foram devidamente referenciados conforme a Norma do Depósito Legal de Trabalho de Culminação do curso que rege na Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane.

Assinatura

---

## Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Miguel João Tomás e Isabel António Jussa, meus muito obrigado pelo apoio, dedicação e por investirem na minha educação, vocês são o meu primeiro motor imóvel em "as 5 vias" de São Tomás de Aquino.

*"[A] mágica, lembremos, é uma arte que requer a contribuição sucinta entre o artista e o seu público "*

E. M. Butler, *The Myth Of the magus* (1948)

## Agradecimentos

Dedico meus sinceros agradecimentos a empresa Açucareira de mafambisse por receberem-me como estagiário, em especial aos responsáveis pela minha supervisão, Sr. Vilanculos, Eng. Zacarias, Sr. Marquel e Eng. Wiston. Também agradeço ao pessoal responsável por acompanhar-me as caldeiras e a central termica, em especial a eng. Lauzane.

Agradeço ao meu supervisor PhD. Eng. Miguel Uamusse por aceitar ser a minha estrela de Belém e juntamente com os engs. Tsamba, Cumbane. Chambal e Venâncio servirem de grande fonte de inspiração.

Agradeço aos meus amigos e colegas, Moane, Aizeque, Nhapele, Wilson, Nhamossa, Pinifolo, Ferramenta, Guta, Tambo, Tima, Dzungo, Lisboa, Jorge, Marino, Grine, Massingue e Saene pelas conversas, estudos e festas. As minhas vizinhas e amigas Wangá e Lina Rafael por proporcionarem uma excelente estadia. Agradeço ao meu colega e Amigo Rosário Zimba por emprestar-me sua família nos dias em que se precisava estar em família. E em especial a minha amiga e colega Názia Bibi Sulemane por ter sido a minha estrela que queima (o meu sol) e iluminar os meus caminhos em dias de obscuridade.

Agradeço ao meu pai, Miguel Tomás por sussurrar engenharia em toda a minha vida, como se não houvessem outras opções, a minha mãe, Isabel Jussa por deixar-me voar livre como um pássaro selvagem e fazer minhas próprias escolhas, aos meus irmãos mais novos, Domingos Miguel Tomás e Suzana Miguel Tomás por serem a minha fonte de inspiração e a minha causa inspiradora. Agradeço a minha irmã mais velha, Filomena Tomás por estar sempre disposta a ajudar-me em dias de tempestade. Agradeço ao meu primo e amigo José Ribeiro pelas chamadas e conselhos em tempos tempestuosos, por ser a minha salvação nos meus dias de dúvida.

E acima de tudo, agradeço a Deus por permitir que tudo se tornasse possível.

*"Já nos demoramos demais nas margens do oceano cósmico. Estamos finalmente prontos para voar para as estrelas."*

Carl Sagan, *Cosmos: Uma jornada pessoal*

"Vejo esta última tempestade como nada muito sério aos olhos do mundo.

então que venha ela, que venha esta última tempestade.

eu, pacientemente,

ja esperei

demais"

Charles Bukowski, *meu último inverno*

## Resumo

A indústria de produção de açúcar enfrenta desafios significativos relacionados à eficiência energética, especialmente no que tange ao uso e gerenciamento de vapor. O presente estudo visa avaliar as oportunidades de conservação e gerenciamento de energia no sistema de geração e distribuição de vapor da Tongaat-Hulett Açucareira de Moçambique, situada na província de Sofala. A análise parte da premissa de que uma parcela considerável da energia utilizada na produção industrial é desperdiçada como calor residual em diversos pontos do processo produtivo. O objetivo do estudo é analisar a eficiência energética das caldeiras e da linha de vapor, obtendo valores quantitativos das perdas de energia, como base para soluções de conservação e gerenciamento. A análise revelou que a eficiência energética da caldeira pode ser melhorada através do uso otimizado do combustível e de isolamento térmico adequado nas tubulações. A implementação de programas sistemáticos de auditoria energética e melhorias contínuas nos sistemas de geração e distribuição de vapor são essenciais para reduzir as perdas energéticas e melhorar a eficiência. A adoção de diâmetros de tubulação otimizados e melhor isolamento pode resultar em uma redução significativa de desperdícios de energia e custos operacionais.

**Palavras chaves:** eficiência energética, de conservação de energia, geração de vapor, distribuição de vapor, Caldeiras, isolamento térmico, Açucareira de Moçambique.

## Abstract

The sugar production industry faces significant challenges regarding energy efficiency, particularly in the use and management of steam. This study aims to evaluate the opportunities for energy conservation and management in the steam generation and distribution system at Tongaat-Hulett: Sugar Mill of Mozambique, located in the Sofala province. The analysis is based on the premise that a substantial portion of the energy used in industrial production is wasted as residual heat in various points of the production process. The objective of the study is to analyze the energy efficiency of the boilers and the steam line, obtaining quantitative values of energy losses as a basis for conservation and management solutions. The analysis revealed that the energy efficiency of the boiler can be improved through optimized fuel use and adequate thermal insulation of systematic energy audit programs and continuous improvements in steam generation and distribution system are essential to reduce energy losses and enhance efficiency. Adopting optimized pipe diameters and better insulation can significantly reduce energy waste and operational costs.

**Keywords:** energy efficiency, energy conservation, steam generation, steam distribution, boilers, thermal insulation, Sugar Mill of Mozambique.

## Lista de Figuras

Figura 1: Produção da Cana-de-Açúcar no País .....	18
Figura 2: Evolução da Plantação da Cana-de-Açúcar em Países Seleccionados .....	19
Figura 3: Sistema de vapor típico .....	23
Figura 4: Balanço de energia em um sistema de vapor típico. ....	25
Figura 5: Gerador de vapor aquatubular .....	29
Figura 6: Esquema básico de uma caldeira aquatubular.....	29
Figura 7:Gerador de vapor flamotubular .....	31
Figura 8: Esquema do interior de uma caldeira flamotubular com três passes e fornalha interna	31
Figura 9: Caldeira flamotubular típica com três passes e fornalha interna. ....	32
Figura 10: Gerador de vapor misto.....	33
Figura 11: Acessórios instalados para melhorar o desempenho da caldeira.....	33
Figura 12: Relação entre o oxigénio livre e a temperatura da água. ....	37
Figura 13:Esquema simples de Purgador para drenagem da linha de vapor. ....	49
Figura 14: Esquema complexo de purgador para drenagem da linha de vapor .....	50
Figura 15: Pontos de colocação de purgadores para drenagem de condensado.....	50
Figura 16: Localização da fábrica em estudo.....	53
Figura 17-a) Moagem de cana-de-açúcar. b) Empacotamento do açúcar produzido .....	57
Figura 18: Transportador (elevador) de bagaço. ....	58
Figura 19: Central eléctrica da Tongaat Hulett .....	58
Figura 20: Digestores.....	61
Figura 21: Amostras do bagaço antes e depois da homogeinização .....	62
Figura 22: TGA acoplado ao infravermelho .....	62
Figura 23: Perdas de carga na primeira secção da tubulação.....	67
Figura 24: Perdas de carga na segunda secção da tubulação .....	67

## Lista de tabelas

Tabela 1: Fábricas de Açúcar a Operar em Moçambique e Capacidade de Produção.....	20
Tabela 2: Análise Comparativa da Eficiência da Indústria Açucareira.....	21
Tabela 3: Preço Médio de Açúcar Castanho (1kg) no Mercado a Retalho .....	21
Tabela 4: Oportunidades de conservação de energia típicas em um sistema de vapor .....	26
Tabela 5: Relação entre a eficiência da combustão, a temperatura dos gases da chaminé e o excesso de ar. ....	36
Tabela 6: Influência da humidade no poder calorífico. ....	40
Tabela 7: Energia necessária (kcal/kg) para gerar um quilograma de vapor saturado .....	42
Tabela 8: Eficiência da combustão de combustíveis comuns .....	42
Tabela 9: Perda de energia (Watts/ano) em 100 metros de tubulação sem isolamento.....	52
Tabela 10: Área de produção de cana-de-açúcar .....	55
Tabela 11 : Produção anual de Energia .....	59
Tabela 12: Tipo de Combustível. ....	60
Tabela 13: Determinação da análise imediata do bagaço de cana de diversos autores. ....	63
Tabela 14: Características nomais da caldeira .....	64
Tabela 15: Características nomais da linha de distribuição de vapor.....	65
Tabela 16: Perdas de energia devido a falta de isolamento .....	68
Tabela 17: Configuração proposta para o sistema de distribuição de vapor .....	69
Tabela 18: Comparação das perdas nas duas configurações do sistema de distribuição de vapor.....	69

## Nomenclatura

### Simbolos

$\rho$	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
$\eta$	Eficiência
$\mu$	Viscosidade dinâmica [m <sup>2</sup> /s]

### Letras

A	Área [m]
g	Aceleração da gravidade [m/s <sup>2</sup> ]
Qs	Calor consumido pela água para a conversão em vapor
L	Comprimento [m]
D	Diâmetro [m]
Hv	Entalpia do vapor [kJ/kg]
ha	Entalpia da água [kJ/kg]
f	Fator de atrito de Darcy-Weisbach [adimensional]
Re	Número de Reynolds [adimensional]
hf	Perdas de carga [m]
PCI	Poder calorífico Inferior [kJ/kg]
PCS	Poder calorífico superior [kJ/kg]
k	Rugosidade equivalente da parede do tubo [mm];
STD	Sólidos totais dissolvidos
T	Temperatura [°C]
P	Pressão [bar]
$\dot{m}_v$	Vazão mássica de vapor [kg/s]
$\dot{m}_c$	Vazão mássica de combustível [kg/s]
v	Velocidade do fluido [m/s].

### Siglas

CF	Carbono fixo
TV	Teor de Voláteis
TGA	Termogravimetria
SADC	Comunidade para o desenvolvimento da África austral
DNA	Direcção nacional de açúcar
PI	Índice de preparo

## **Abreviaturas**

APAMO	Associação dos Produtores de Açúcar de Moçambique
Brix	Percentagem de sólidos solúveis
<i>Comb</i>	Consumo óptimo do combustível
DAC	Departamento de análise de cana
Pol	Percentagem de sacarose
MilLab	Laboratório de análise do sumo

## Índice

Dedicatória .....	i
Agradecimentos.....	ii
Resumo .....	iv
Abstract.....	v
Lista de Figuras .....	vi
Lista de tabelas .....	vii
Nomenclatura .....	viii
I. Introdução .....	13
1.1. Contextualização.....	13
1.2. Justificativa.....	14
1.3. Problematização.....	15
1.4. Hipóteses .....	16
1.5. Objetivos .....	17
1.5.1. Objetivo geral .....	17
1.5.2. Objetivos específicos.....	17
2. REVISÃO DA LITERATURA / ESTADO DA ART .....	18
2.1. A Indústria Açucareira Em Moçambique .....	18
2.1.1. Produção da Cana-de-Açúcar .....	18
2.1.2. Panorama e Desempenho da Indústria Açucareira em Moçambique.....	19
2.2. Vapor.....	22
2.2.1. Sistema De Vapor Típico .....	23
2.3. Oportunidades De Conservação De Energia Na Geração De Vapor.....	28
2.3.1. Caldeiras .....	28
2.3.2. Perdas Na Casa De Caldeira .....	34
2.3.3. Rendimento Da Caldeira .....	41
2.3.4. Eficiência Da Caldeira.....	43
2.3.5. Consumo Ótimo De Combustível .....	46

2.4. Oportunidades De Conservação De Energia Na Distribuição De Vapor.....	46
2.4.1. Dimensionamento De Tubulação .....	47
2.4.2. Purgadores .....	49
2.4.3. Isolamento Térmico.....	51
3. Metodologia.....	53
3.1. Descrição da área de estudo .....	53
3.2. Preparação Do Bagaço De Cana De Açúcar Como Combustível.....	54
3.2.1. Processo de produção agrícola (a cultura de cana-de-açúcar) .....	55
3.2.2. Obtenção Do Bagaço Da Cana .....	55
3.2.3. Produção De Energia Eléctrica.....	57
3.3. Quantidade De Combustível .....	60
3.4. Determinação Das Propriedades Termo-Físicas Do Bagaço .....	61
4. Análise De Dados E Discussão Dos Resultados .....	63
4.1. Determinação Das Propriedades Termo-Físicas Do Bagaço. ....	63
4.2. Características nominais da caldeira e da tubulação de vapor.....	64
4.3. Eficiência Da Caldeira Pelo Método Directo.....	65
4.4. Taxa De Evaporação E Consumo Óptimo De Combustível.....	66
4.5. Avaliação Das Perdas De Carga Na Linha De Vapor .....	66
4.6. Avaliação das perdas térmicas devido a falta de isolamento na linha de vapor .....	68
4.7. Proposta De Solução De Conservação De Energia .....	69
5. Conclusão .....	71
5.1. Recomendações .....	71
6. Referências bibliográficas .....	72
Apêndice .....	77
ANEXO A – Comprimentos equivalentes em conexões .....	88
ANEXO B: Características nominais da caldeira N.2 .....	89
ANEXO C: Fluxograma de processo de uma usina sucroenergética .....	90
ANEXO D: Recorte do sector das caldeiras do fluxograma de processo de uma usina .....	91

ANEXO E: Tabela de propriedades da água saturada.....	92
ANEXO F: Tabela de propriedades do líquido-vapor saturado.....	93
ANEXO G: Tabela de propriedades do vapor superaquecido .....	94
ANEXO H: Factor de fricção de darcy.....	95
ANEXO I: Valores da rugosidade absoluta equivalente .....	96
ANEXO J: Declaração de estágio .....	97

# **I. Introdução**

## **1.1. Contextualização**

Estima-se que entre 20 a 50% da energia direcionada à produção industrial seja desperdiçada como calor residual nos gases de exaustão, fluidos de aquecimento, superfícies de equipamentos e produtos aquecidos (BCS, 2008). Considerando a necessidade de eficiência energética, a recuperação desse calor residual constitui uma oportunidade como fonte energética alternativa e de baixo custo, com implicações na sustentabilidade industrial.

A implementação de medidas que incluam a redução da quantidade de energia primária necessária nos processos de produção é indispensável para a competitividade industrial, e também para a utilização eficiente dos recursos naturais. No entanto, isso está intrinsecamente ligado a um programa educativo focado na apresentação das possibilidades de uso eficiente de insumos energéticos, objectivando um padrão de produção eficaz.

Segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos (2002), o consumo energético industrial é composto de vapor (34%); combustível (47%) e electricidade (19%). A Indústria converte aproximadamente 70% do combustível que adquire em vapor. A utilização de vapor como meio de transmissão de energia ocorre desde o início da revolução industrial (DA SILVA, 2013; RODRIGUES, 2012). O vapor é obtido a partir da água, composto mais abundante da natureza e, portanto, de fácil obtenção e a baixo custo. Sua temperatura pode ser facilmente controlada através do controlo da pressão. Tem um elevado conteúdo energético por unidade de massa e volume, e ao condensar, liberta essa energia ao meio que se pretende aquecer. Pode ser transportado por tubagens, percorrendo grandes distâncias entre os pontos de geração e utilização (DA SILVA, 2013; ELETROBRAS, 2005b; BABCOCK & WILCOX, 1985; SPIRAX SARCO, 2004; RODRIGUES, 2012). Tornando-se assim uma importante fonte de transmissão de energia para as indústrias com inúmeras vantagens na sua utilização, conjugando baixo preço, elevada densidade energética e altas taxas de transferência de calor (DA SILVA, 2013; ELETROBRAS, 2005b).

A eficiência energética de um sistema pode ser obtida através das avaliações energéticas identificando parâmetros termodinâmicos, como quantidade de trabalho realizado e calor transferido. Com o uso da termodinâmica é possível avaliar as perdas de energia do sistema e classifica-los qualitativamente e quantitativamente. As avaliações irão auxiliar na determinação dos pontos de desperdício e locais que tenham margem para implementação de melhorias. (DA SILVA, 2013; BOLES, 2007; ELETROBRAS, 2007; ÇENGEL; WANG, 2009;). Estudos indicam

que é possível conseguir uma redução de desperdícios de insumos na ordem de 20 a 30% sem capital de investimento, utilizando apenas mudanças operacionais e de comportamento (FISHER; BLACKMAN; FINNELL, 2007). O custo efectivo do consumo de energia das indústrias pode ser reduzido de 10 a 20% através de um programa bem estruturado de gerenciamento energético que combine tecnologia, controle de práticas operacionais e um plano de conservação de energia (CAPEHART; SPILLER; FRAZIER, 2006).

## **1.2. Justificativa**

Nos últimos anos, as questões ambientais têm-se tornado cada vez mais importantes no desenvolvimento industrial e econômico do país. O Desenvolvimento econômico deve levar em conta a sustentabilidade ambiental. Em Moçambique, essa situação não é diferente. Devido ao impacto ambiental causado pelo uso de combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral, gás natural, etc.), o país investe na expansão da sua base energética com foco no uso de energia alternativa e renovável, como por exemplo, a biomassa.

A biomassa como fonte de energia alternativa, possui um grande potencial energético para o país, que é um produtor de cana-de-açúcar, uma matéria-prima que pode ser totalmente reaproveitada pelas indústrias. A cana pode ser amplamente utilizada para a produção de vários produtos como, o álcool, o açúcar e o combustível, contribuído assim para a redução dos impactos causados pelo uso de combustíveis fósseis.

Moçambique também se beneficia do facto de que domina uma matriz energética renovável. No entanto, apesar da existência dos recursos energético em questão, os sistemas de vapor precisam garantir o uso eficiente do combustível, com vista na redução dos desperdícios de energia térmica.

Sendo um factor de produção, a energia deve ser gerida continuamente e de forma eficaz. Embora as indústrias tenham como factor determinante para a competitividade das mesmas a questão de custos, a actual situação ambiental reforça a necessidade de utilizar a energia de forma racional. As auditorias de energéticas são um exame detalhado das condições de utilização de insumos energéticos em uma instalação. Estas auditorias permitem identificar onde, quando e como a energia é utilizada ou convertida, a eficiência dos equipamentos e os pontos de desperdícios de energia, possibilitando a recomendação de soluções com viabilidade técnica e económica para corrigir essas anomalias. (CAPEHART; TURNER; KENNEDY, 2005).

A eficiência térmica de caldeiras pode variar entre 80 a 85% (ELETROBAS,2005). Assim, rendimentos inferiores evidenciam maiores perdas energia, tornando necessária uma correção imediata. Uma eficiência baixa resulta na queima de mais combustível para produzir a mesma quantidade de vapor, influenciando nos custos de geração de vapor e na sustentabilidade ambiental.

O presente estudo se justifica, na importância de se conhecer a quantidade de desperdício energético do sistema de vapor em estudo, através da determinação da eficiência dos sistemas de geração e de distribuição de vapor. Este parâmetro é fundamental para unidades industriais, pois considera a proporção de transformação da energia química do combustível em vapor de processo. Assim, quanto maiores forem as perdas de calor, menor será o rendimento térmico e maior será o custo do produto.

### **1.3. Problematização**

O uso de vapor como meio de transmissão de energia fornece muitas vantagens para as indústrias, visto que, água é uma substância abundante, quimicamente pouco agressiva, e com elevada taxa de transferência de calor. Cerca de 15 kg de vapor contêm a energia equivalente a 1 kg de óleo ou 3 kg de lenha. Durante a geração e utilização de vapor, ocorrem mudanças de fase, observadas durante a vaporização e durante a condensação, que provocam grandes variações de volume, resultando num elevado coeficiente de transferência de calor. E, devido à alta densidade energética (calor latente) do vapor, produz uma elevada taxa de transferência de calor por unidade de área.

Sendo Assim, pode-se escolher entre produzir calor a partir da queima de combustíveis junto ao ponto de utilização, levando em conta as dificuldades com relação ao transporte, controle e exaustão dos gases, ou gerar esse mesmo calor em um local mais afastado e transportá-lo utilizando vapor. A substância em questão apresenta características de pureza e não provoca problemas significativos de poluição ambiental; assim, esta última rota foi considerada a mais vantajosa e adequada. E assim operam todos os sistemas de vapor no nosso país e o mundo

A análise da eficiência em equipamentos térmicos é extrema importância para que as indústrias possam avaliar o desempenho dos equipamentos instalados e selecionar novas aquisições. E existem normas que ditam a eficiência dos equipamentos definidas pelo fabricante como é o caso das normas DIN (alemã) ou ASME (americana), que adoptam parâmetros distintos para um mesmo equipamento.

Apesar das considerações mencionadas, é ainda necessário realizar auditorias energéticas em indústrias e nos consumidores de energia térmica, com o objetivo de melhorar o desempenho dos sistemas de vapor. Adicionalmente, é essencial garantir a adoção de medidas mitigadoras para perdas que sejam viáveis economicamente e a longo prazo.

Com a problemática acima supracitada, surge a seguinte questão:

**Os equipamentos térmicos instalados na Tongaat-Hullet: Açucareira de Moçambique tem tido um bom desempenho como sistemas de geração, distribuição e utilização de Vapor?**

#### **1.4. Hipóteses**

Com base nas problematizações apresentadas anteriormente, podemos formular algumas hipóteses relacionadas ao desempenho dos sistemas de geração, distribuição e utilização de vapor na na Tongaat-Hullet: Açucareira de Moçambique. Essas hipóteses são suposições que podem ser testadas e confirmadas por meio da determinação dos parâmetros de eficiência térmica na geração e distribuição de vapor. Algumas hipóteses possíveis incluem:

**Hipótese 1:** Os sistemas de geração, distribuição e utilização de vapor da Tongaat-Hullet: Açucareira de Moçambique opera de forma eficiente, com um rendimento dentro das normas no sistema de geração, com baixas perdas de energia devido as condições fluido-dinâmicas de escoamento no sistema de distribuição e baixos desperdícios de vapor nos sistemas de utilização.

**Hipótese 2:** Os sistemas de geração, distribuição e utilização de vapor da Tongaat-Hullet: Açucareira de Moçambique opera de forma não eficiente, com uma baixa eficiência no sistema de geração, elevadas perdas de carga nas tubulações de distribuição e grandes quantidades de vapor desperdiçados em purgas na utilização.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo geral**

Analisar a eficiência energética da caldeira e da linha de vapor para obter valores quantitativos das perdas como base de uma solução de conservação e gerenciamento de energia no sistema de geração e distribuição de vapor na açucareira de Moçambique.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Fazer o levantamento dos dados da fábrica em estudo;
- Determinar as propriedades termo-físicas do Bagaço da cana;
- Calcular a eficiência da caldeira;
- Determinar o consumo óptimo do combustível;
- Determinar as perdas de energia devido as condições fluido-dinâmicas de escoamento nas linhas de distribuição de vapor;
- Determinar as perdas de energia devido a temperatura nas tubulações de vapor;
- Propor uma solução de conservação de energia durante a geração e distribuição de vapor, que consiste na identificação do melhor diâmetro em relação as perdas, na escolha dum isolameto e dimensionamento do raio óptimo de modo a reduzir as perdas de energia

## 2. REVISÃO DA LITERATURA / ESTADO DA ART

### 2.1. A Indústria Açucareira Em Moçambique

#### 2.1.1. Produção da Cana-de-Açúcar

O país apresenta condições favoráveis à produção de cana-de-açúcar. Esta cultura é cultivada em regiões tropicais, onde existem solos férteis e abundância de água, factores que influenciaram a localização das fábricas de processamento nos vales dos rios Zambeze, Búzi e Incomáti. Além disso, a infraestrutura portuária confere ao país uma vantagem no escoamento da produção nacional. É importante destacar que Moçambique possui uma área total de 48 milhões de hectares (ha), dos quais 36 milhões (75%) são terras aráveis, enquanto a área dedicada ao cultivo de cana-de-açúcar é apenas de 41.000 ha (0,1%) (USAID, 2015).

O cultivo e a produção destinada ao processamento industrial da cana-de-açúcar em Moçambique tiveram início nos finais do século XIX antes da independência do país. nos vales dos rios Zambeze e Búzi, onde foram instaladas quatro fábricas (Companhia de Búzi, Açucareira de Moçambique, Sena Sugar Estates de Marromeu e Sena Sugar Estates de Luabo). Posteriormente, a produção expandiu-se para o Sul, com a instalação de duas unidades fabris ao longo do rio Incomáti (Xinavane e Maragra). Tendo atingido o pico em 1972.

Contudo, após a independência, a produção sofreu uma queda acentuada, refletindo, entre outros factores, os efeitos da guerra civil. Esta situação foi revertida após a intervenção do Governo, que implementou a privatização das fábricas e adotou medidas protecionistas (figura 1).

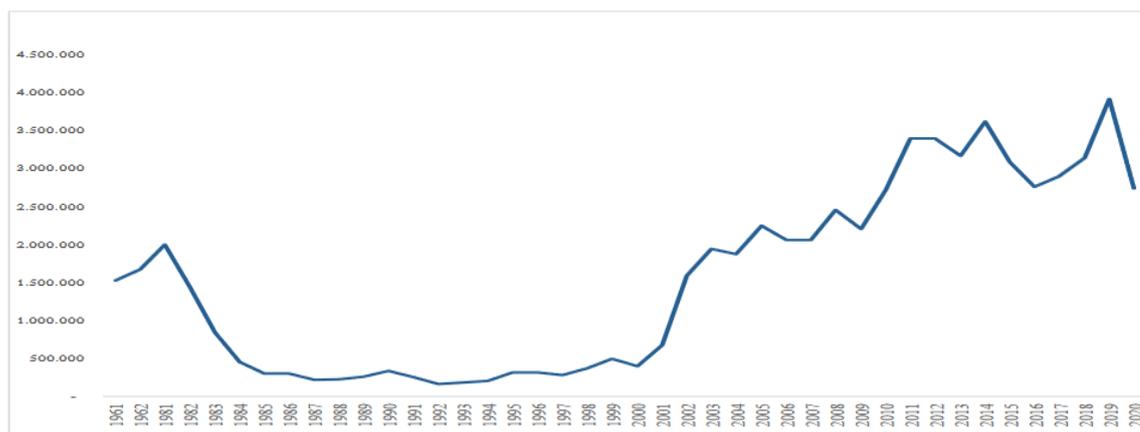


Figura 1: Produção da Cana-de-Açúcar no País (1961-2020) – Toneladas. Fonte: FAO (2022)

A expansão da produção da cana-de-açúcar tem sido modesta, tendo em conta o potencial agrícola do país. Apesar de dispor de terra e condições climáticas favoráveis, a actual produção da cana-de-açúcar ainda se mantém, praticamente, nos mesmos níveis que no período colonial

(figura 2). Após atingir um recorde na área plantada (60.000 hectares), em 1976, o país registou sucessivas reduções da área cultivada, a reflectir as nacionalizações e os impactos da guerra civil, tendo conseguido recuperar e registar o mesmo desempenho em 2019 (43 anos depois).

De acordo com a associação de produtores de açúcar de Moçambique (APAMO), às graves relacionadas às mudanças climáticas também tem impactado negativamente na expansão da produção no actual período.

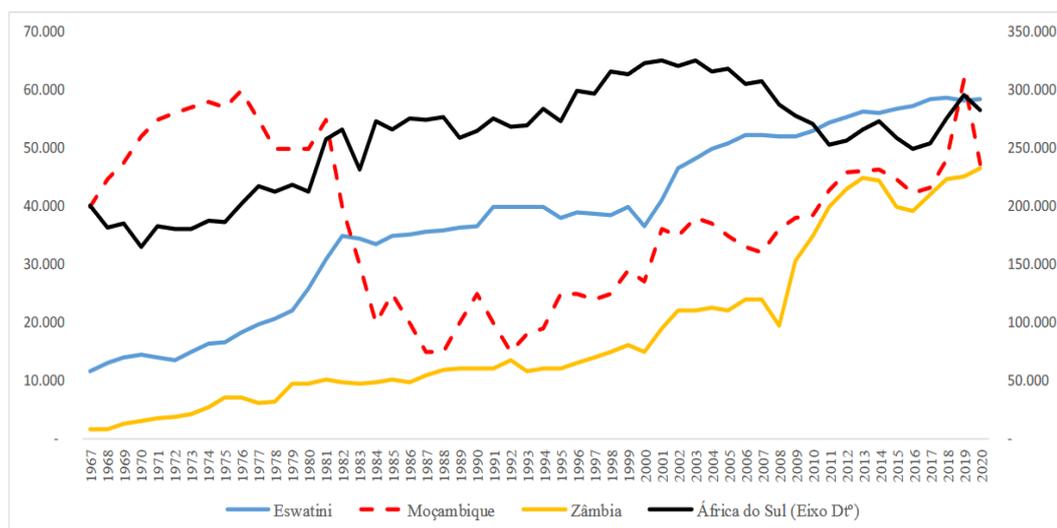


Figura 2: Evolução da Plantação da Cana-de-Açúcar em Países Seleccionados (1961-2020) – há. Fonte: FAO (2022)

Às Açucareiras são responsáveis por 75% da produção e o remanescente é provido por produtores independentes, este último, não possui conhecimento do preço de açúcar, factor que influencia na negociação do preço de venda à porta da fábrica e também não possuem domínio das ferramentas utilizadas pelas indústrias para a determinação destes mesmos preços. Conjugando este factor à ausência de um preço de referência da cana-de-açucar e de uma organização à nível nacional de produtores, é considerado um desincentivo a expansão da produção por parte dos produtores independentes.

### 2.1.2. Panorama e Desempenho da Indústria Açucareira em Moçambique

Existem no país, sete fábricas de produção de açúcar, divididas em dois grandes grupos. O primeiro grupo agrupa quatro fábricas que se dedicam a produção do açúcar convencional e refinado, estas localizam-se nas províncias de Maputo e Sofala, que produzem anualmente 530 mil toneladas de açúcar bruto (MIC 2022). O segundo grupo agrega três fábricas destinadas a produção de açúcar orgânico para o mercado internacional. Estas localizam-se nas províncias de Maputo,

Sofala e Cabo delgado, com uma capacidade de produção anual de 29,3 mil toneladas - tabela 1. O sector do açúcar envolve as 7 fábricas de processamento, 4 mil produtores de cana de açúcar, um órgão responsável pelo comércio do açúcar, e uma associação de produtores do açúcar. (MIC 2022)

*Tabela 1: Fábricas de Açúcar a Operar em Moçambique e Capacidade de Produção.*

<b>Fábricas licenciadas</b>	<b>Localização (província)</b>	<b>Capacidade de produção (toneladas)</b>	<b>Produção média por campanha no período 2017/2021</b>
<b>Convencional e Refinado</b>			
<b>Maragra Açúcar, S.A.</b>	Maputo	96.000 / ano	70.701
<b>Tongaat,Hullett Açucareira de Mafambisse</b>	Sofala	90.000 / ano	38.399
<b>Companhia de Sena, S.A.</b>	Sofala	110.000 / ano	36.382
<b>Tongaat Hullett - Açucareira de Xinavane, S.A.</b>	Maputo	234.000 / ano	169.935
<b>SUB-TOTAL 315.418</b>		530.000 / ano	
<b>Orgânico</b>			
<b>Pure Diets Moçambique</b>	Maputo	10.000	Nd
<b>Eco Farm Moçambique</b>	Sofala	10.000	10.000
<b>Eco Energia de Moçambique</b>	Cabo delgado	9.300	Nd
<b>SUB-TOTAL</b>		29300 / ano	

Fonte: APAMO(2022)

Comparativamente com outros países, às fábricas em Moçambique produzem apenas o açúcar, com foco no açúcar mascavo, refinado e orgânico. Os subprodutos envolvidos na produção do açúcar como o bagaço, a palha e o melaço que são matérias-primas para a produção de biocombustíveis e energia não são explorados de forma comercial como o açúcar.

O nível de eficiência de transformação da cana para açúcar (rácio) e da transformação de cana por hectare é relativamente baixo quando comparado com a eficiência de outros países, no entanto, o preço do açúcar a retalho por kg é competitivo como demonstrado na tabela 2.

Da tabela 3 verifica-se que existe uma vantagem de preços para o produto nacional, quando comparado com alguns países da SADC. Em Julho de 2022 o preço do açúcar chegou a 1,24 USD/Kg.

*Tabela 2: Análise Comparativa da Eficiência da Indústria Açucareira – 2022*

<b>País</b>	<b>Rácio de transformação de toneladas de cana para a produção de uma tonelada de açúcar</b>	<b>Rendimento médio de cana/hectare (tonelada)</b>
<b>Essuatíni</b>	8.3	98,0
<b>África do Sul</b>	8.7	65,0
<b>Moçambique</b>	9.7	56,2

Fonte: FAO (2022)

*Tabela 3: Preço Médio de Açúcar Castanho (1kg) no Mercado a Retalho (Junho de 2022)*

<b>País</b>	<b>Preço Médio de 1 kg Açúcar (USD)</b>
<b>Essuatíni</b>	0,51
<b>Malawi</b>	1,22
<b>Moçambique</b>	1,24
<b>Tanzânia</b>	1,29
<b>Zimbabwe</b>	1,53

<b>África do Sul</b>	1,64
<b>Zâmbia</b>	1,98
<b>Média Mundial</b>	1,25

Fonte: Global Product Prices (2022).

Apesar da recente tendência de declínio, a indústria açucareira contribuí significativamente para a economia do país, aumentando os postos de trabalho e empregam na cadeia de valor mais de 31 mil pessoas na época de pico de campanha. No entanto a contribuição econômica do açúcar na indústria transformadora reduziu de 8,2% em 2011 à 2015 para 3,1 em 2016 à 2021.

Em termos de contribuições fiscais, a indústria teve uma queda em mais de 100%, de 634 milhões de Meticais em 2017 para 281 milhões de Meticais em 2021.

Em face da situação moçambicano que objectiva um modelo de geração e utilização de energia de forma sustentável, às açucareiras em moçambicano empregam um sistema de geração autossuficiente de energia para a produção, utilizando o bagaço da cana-de-açúcar como combustível para às caldeiras, gerando vapor para aplicação nos sopradores, moendas, evaporadores, cristalizadores, limpeza, aquecedores e geradores de energia elétrica (ENSINAS et al., 2014; NETO; RAMOM,2002).

## 2.2. Vapor

Dentre às principais formas de energia utilizadas pelas indústrias estão, a electricidade, os combustíveis e o vapor. A electricidade é aplicado no accionamento mecânico e no aquecimento, os combustíveis fornecem energia química através da combustão e o vapor é àquele que apresenta maior benefício ao processo sendo seguro e de baixo custo. O vapor também fornece um rápido aquecimento, um controlo preciso da temperatura e da pressão e elevados coeficientes de transferência de calor. (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2004; BABCOCK & WILCOX, 1985). O vapor também armazena mais calor a baixo custo comparativamente a outras formas de energia e é facilmente transportado através de tubulações, aumentando às vantagens para o seu uso como meio de transmissão de energia (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2004; SPIRAX SARCO, 2011)

Na natureza, à água encontra-se em três estados: sólido, líquido, gasoso. Ao fornecer energia para a água líquida, aumenta a sua entropia e o grau de agitação das moléculas até ocorrer o rompimento das ligações entre os átomos que constituem à água líquida dando-se assim a sua

vaporização (FERNANDES; PIZZO; MORAES.JUNIOR, 2006). O estado físico em que a água de encontra é função das condições de temperatura e pressão. Ao alterarmos a temperatura ou pressão do sistema podem ocorrer mudanças de fase (fusão/solidificação, Sublimação/deposição ou Vaporização/condensação) (RUSSEL, 2008; WYLEN; SOONTAG; BORGNAKKE, 1995).

### 2.2.1. Sistema De Vapor Típico

O vapor, permite transportar energia de um ponto de geração, até os pontos de utilização (SPIRAX SARCO, 2011).

Em condições ideais um sistema de vapor típico é constituído pelos seguintes elementos: Sistema de geração (caldeiras), sistema de distribuição (linhas de vapor), sistemas de utilização (pontos de consumo) e sistemas de retorno do condensado-figura3 (SPIRAX SARCO, 2011; PALACIOS, 2010; RODRIGUES, 2012; ELETROBRAS, 2005b; DA SILVA,2023). Estes elementos do sistema conectam-se entre si, portanto, qualquer falha num dos componentes, todo o sistema fica comprometido e como consequência surgirão elevadas perdas de energia e um aumento dos custos de operação e do produto (PALACIOS, 2010; DA SILVA,2013).

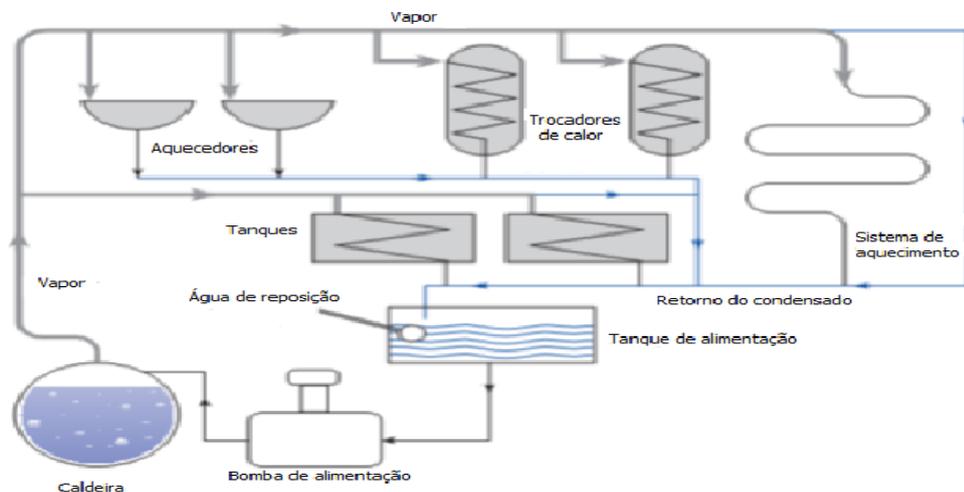


Figura 3: Sistema de vapor típico. Fonte: Palácios (2010)

O vapor é gerado na caldeira e transportado pelas linhas de vapor até os sistemas de utilização, onde irá ceder energia para o processo e condensar. Para economia dos sistemas, o condensado é purgado e reutilizado pela caldeira. O entendimento dum sistema de vapor típico possibilita o entendimento de qualquer sistema de vapor específico e permite identificar os pontos de desperdício e propor melhorias

### ***2.2.1.1. Geração De Vapor***

Caldeiras são equipamentos utilizados para gerar vapor mediante a transferência de calor entre um determinado combustível e uma massa de água até a sua mudança de fase, e ela, é o ponto inicial do sistema de vapor, ela abrange desde a alimentação da água até a saída de vapor (PALACIOS, 2010; NASCIMENTO JUNIOR; SARTORELLI, 2009; TROVATI, 2012). Para aumentar a eficiência dos sistemas e a sustentabilidade do processo, reutiliza-se o calor residual do processo. A saída do vapor da caldeira para os sistemas de distribuição é consequência da elevada pressão de vapor no sistema.

### ***2.2.1.2. Distribuição De Vapor***

A distribuição de vapor é feito mediante a instalação de um sistema de tubulações denominada linhas de vapor que, tem por finalidade, transportar o vapor do ponto de geração até o ponto de utilização. No seu dimensionamento deve ter em conta, a distância, a posição, a característica do consumidor de vapor, a drenagem correcta, às válvulas, os condensados, e o isolamento térmico de forma a obter um diâmetro capaz de manter a temperatura e pressão exigidos nos pontos de utilização (RODRIGUES, 2012; PALACIOS, 2010; ELETROBRAS, 2005b).

### ***2.2.1.3. Utilização De Vapor***

Devido a sua flexibilidade o vapor saturado é usado em vários locais e para vários fins desde, limpeza, aquecimento e geração de energia elétrica, entre outros (ELETROBRAS, 2005b; SPIRAX SARCO, 2011). Dentre os principais utilizadores da vapor nas indústrias estão, os evaporadores, os trocadores de calor e às turbinas. Quando o vapor entra em contacto com superfícies de menor temperatura o vapor transfere calor latente e retorna ao estado líquido (condensa) (U. S. DEPARTAMENT OF ENERGY, 2000; PALACIOS, 2010). O condensado é água destilada e armazena calor sensível, portanto, pode ser aproveitado em outros processos na indústria de alimentos (SPIRAX SARCO, 2011; PALACIOS, 2010). Para uma maior eficiência do sistema é necessário fazer um estudo e determinar os parâmetros de operação do processo de forma a otimizar as condições de operação e permitir que o vapor chegue aos pontos de utilização em condições ideais.

### ***2.2.1.4. Retorno Do Condensado***

Durante a distribuição e utilização de vapor ocorrem a formação de condensado que deve imediatamente ser removido de forma a garantir maior desempenho nas transferência de calor. Depois de removido o condensado é purgado da alta pressão do sistema para a pressão atmosférica,

onde re-evapora e produz o vapor Flash que pode ser usado para complementar às cargas de baixo pressão do processo (SPIRAX SARCO, 2005; PALACIOS, 2010).

#### 2.2.1.5. Perdas Térmicas

Durante a geração de vapor, a energia química do combustível é convertido em energia térmica do vapor, mediante uma reação de combustão. Durante esta conversão parte da energia que se deveria converter é perdida. Estas perdas podem ocorrer em todo sistema desde a geração até a utilização de vapor, e devido a vários factores, como, incrustações nas linhas de vapor, humidade do combustível, falta de isolamento eficiente, purgado entre outros. A tabela 4 apresenta às principais oportunidades de de conservação de energia e aumento de eficiência em sistemas de vapor (BARRIGA, 2012; RODRIGUES, 2012; ELETROBRAS, 2005b; WANG, 2008). A eficiência energética de um sistema de vapor relaciona a energia inserida com a energia consumida (NASCIMENTO JUNIOR; SARTORELLI, 2009; WANG, 2008). A figura 4 apresenta um balanço energético típico dos sistemas de vapor, onde verifica-se que entre 25% à 44% de toda energia que é admitida no sistema é perdida. Isto também demonstra às oportunidades de melhoria dos sistemas com a optimização de processos e dos sistemas de utilização de vapor (RODRIGUES, 2012; ELETROBRAS, 2005).

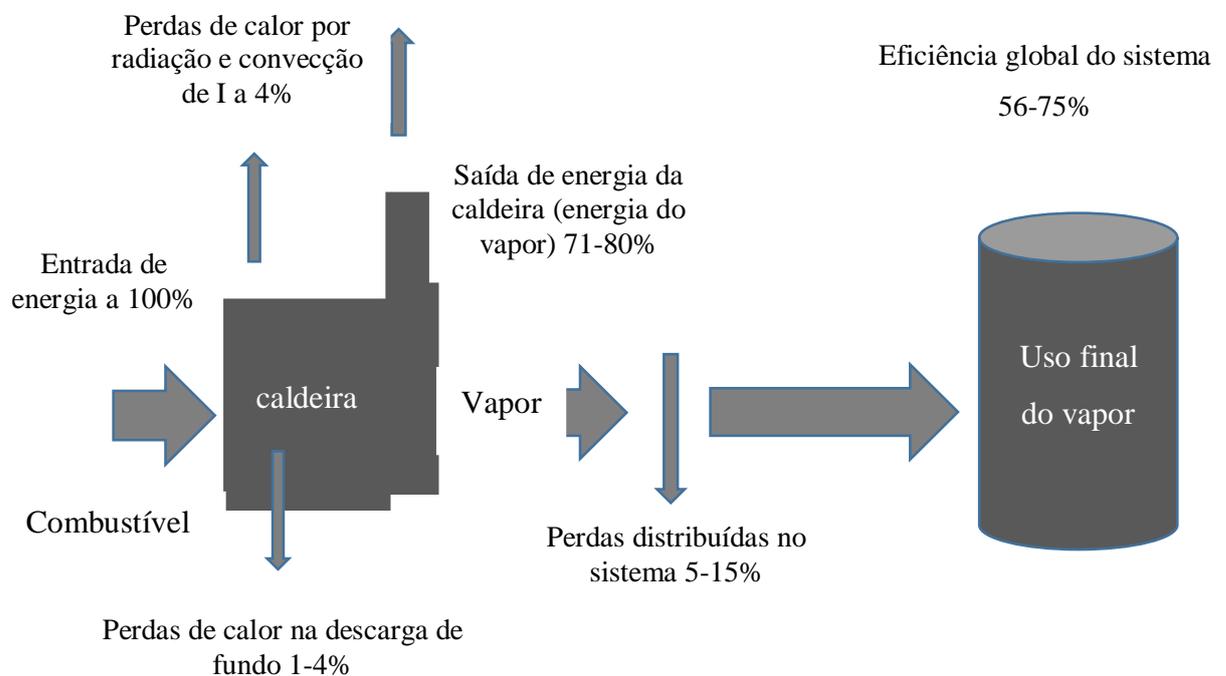


Figura 4: Balanço de energia em um sistema de vapor típico.

Tabela 4: Oportunidades de conservação de energia típicas em um sistema de vapor

<b>Geração de Vapor</b>	
<b>Áreas de melhoria</b>	<b>Medidas para reduzir perda</b>
<b>Eficiência da caldeira</b>	-Medições frequente dos gases; -Verificação do excesso de ar.
<b>Economizador</b>	-Instalar para aquecimento da água de alimentação
<b>Isolamento térmico</b>	-Manutenção E isolamento tubulação da água de alimentação da caldeira; -Manutenção e isolamento do costado da caldeira.
<b>Incrustações</b>	Limpeza e inspeção das áreas de transferência de calor.
<b>Água de alimentação</b>	Tratamento eficiente para eliminar gases e sólidos dissolvidos e sólidos suspensos; -Manter temperatura constante.
<b>Descargas</b>	-Evitar descargas excessivas.
<b>Distribuição de Vapor</b>	
<b>Condensado</b>	-Drenagem eficiente nos pontos de acúmulo; -Instalação e manutenção de purgadores, separadores de umidade e botas coletoras.
<b>Isolamento térmico</b>	-Manutenção e isolamento da tubulação.
<b>Ar</b>	-Verificar presença em pontos altos e finais de linha para eliminação;

	-Aplicação de elementos termostáticos para eliminação
<b>Vazamentos</b>	-Verificação frequente e reparo.
<b>Utilização de Vapor</b>	
<b>Pressão de operação</b>	-Redução da pressão no ponto de consumo
<b>Áreas de troca térmica</b>	-Limpeza e manutenção
<b>Isolamento térmico</b>	-Manutenção e isolamento de partes aquecidas.
<b>Eficiência dos consumidores</b>	-Verificação do desempenho dos equipamentos
<b>Retorno do Condensado</b>	
<b>Vapor flash</b>	-Verificação do aproveitamento; -Considerar sua formação no dimensionamento da tubulação.
<b>Retorno do condensado</b>	-Verificação dos pontos onde o condensado não é recolhido; -Possibilidade de retorno por gravidade; -Verificação da viabilidade do bombeamento
<b>Isolamento térmico</b>	-Isolamento do tanque de condensado; -Isolamento da tubulação

## **2.3. Oportunidades De Conservação De Energia Na Geração De Vapor**

A caldeira é o principal componente do sistema de geração de vapor como fonte de energia. Sua eficiência irá determinar a qualidade e a quantidade de vapor disponível para o processo, também irá determinar os custos do vapor e os aspectos técnicos e econômicos.

### **2.3.1. Caldeiras**

A caldeira é um trocador de calor que produz vapor mediante a combustão de combustíveis. E incorpora outros elementos que objectivam a melhoria da eficiência do sistema (RODRIGUES, 2012; PALACIOS, 2010; NASCIMENTO JUNIOR; SARTORELLI, 2009).

Nas indústrias, o custo de aquisição e ópera das caldeiras é muito elevado, portanto demanda uma grande responsabilidade técnica. O dimensionamento, a operação e a manutenção são feitos seguindo normas padronizadas.

De acordo com a operação às caldeiras podem ser classificadas em três tipos encontrados (SPIRAX SARCO, 2005; TROVATI, 2012; BIZZO, 2012; MARTINELI JUNIOR, 1998):

- Caldeiras Aquatubulares: onde os gases de aquecimento circulam fora dos tubos, e a água circula dentro dos tubos;;
- Caldeiras Flamotubulares: onde os gases de aquecimento circulam dentro dos tubos, e água circula fora dos tubos;;
- Caldeiras Mistas: são caldeiras flamotubulares acoplados a uma antecâmara de combustão com tubos de água revevistidos nas paredes.

#### **2.3.1.1. Caldeiras Aquatubulares**

As caldeiras aquatubulares possuem uma grande capacidade de produção e pressão de operação (SPIRAX SARCO, 2000; TROVATI, 2012). A Figura 5 representa uma caldeira aquatubular. A maior quantidade de energia é absorvida pelas paredes expostas às chamas, onde ocorre a transferência de valor por radiação. Em sistemas bem dimensionados, às paredes de água perfazem menos de 10% da superfície de transferência de calor total e absorvem quase metade de toda energia liberada na queima do combustível. Para além da radiação, também verifica-se a transferência de calor por condução e convecção (MARTINELI JUNIOR, 1998).

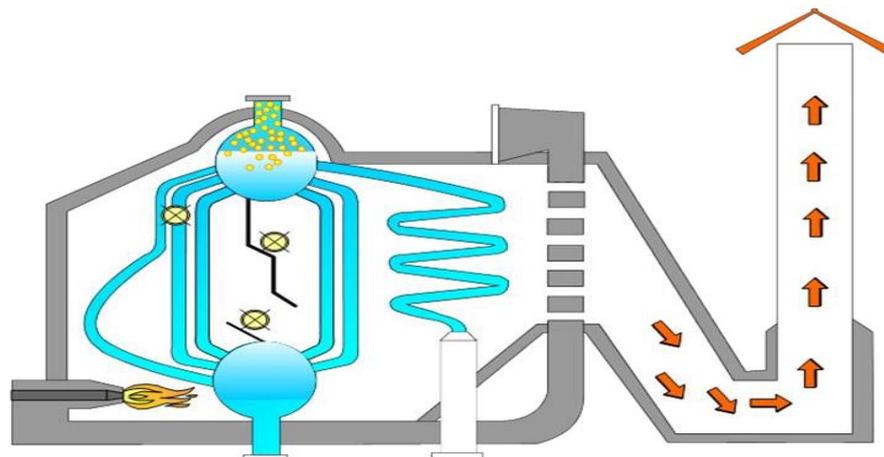


Figura 5: Gerador de vapor aquatubular, Fonte: Spirax Sarco (2005).

Nestas caldeiras a água circula dentro dos tubos e os gases de aquecimento passam por fora, e são geralmente conectados com outras tubulões/tambores cilíndricos- Figura 6. Assim, o aquecimento dos tubos, dá-se por intermédio do calor transferido pelos gases de combustão. O tubulação inferior fica repleto de água e é o ponto mais baixo da caldeira. A lama que se desenvolve na caldeira, sedimenta e é extraída do tambor inferior. No entanto, em caldeiras modernas, devido a pureza da água alimentada não há formação da lama, eliminando assim a necessidade do tambor inferior (DUKELOW, 1991)

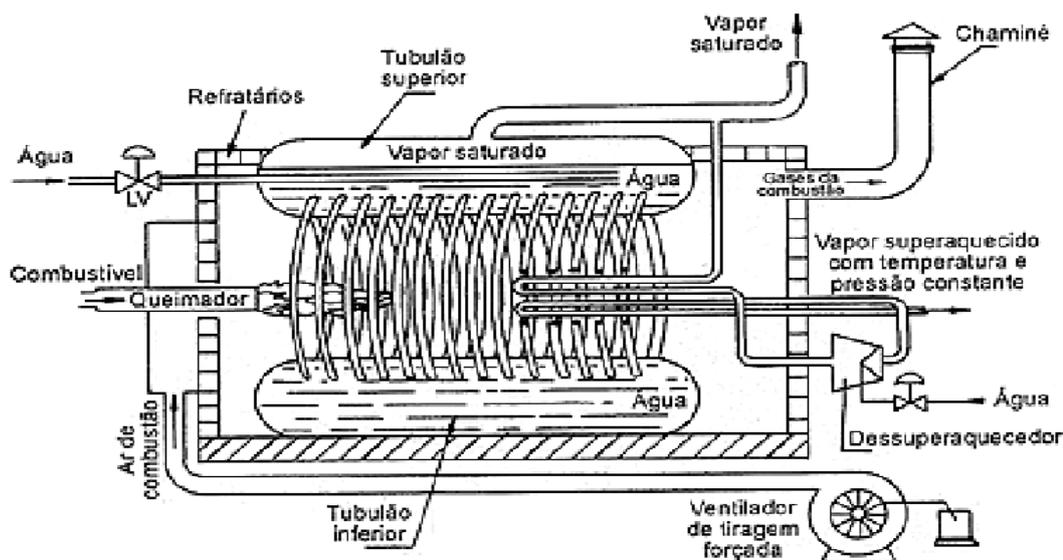


Figura 6: Esquema básico de uma caldeira aquatubular, Fonte: BEGA, 2003

Em contrapartida, o tambor superior, é responsável por manter o nível do líquido em 50% através dum sistema de controlo acoplado ao mesmo. A caldeira possui uma câmara de combustão refratária para impedir perdas de energia para o ambiente (BEGA, 2003).

A água circula devido ao aquecimento dos tubos ("riser"), pelos gases de aquecimento e o vapor é liberado no tambor superior - Figura 6. Assim, quando o sistema está cheios de água, se estabelece uma diferença de peso específico entre a água ascendente dentro dos tubos (zona radiante) e a água desentende dos tubos (zona de convecção). a água com menor peso específico é empurrado para o tambor de vapor, pela água com maior peso específico, iniciando assim, o processo de circulação. (DANTAS, 1988)

O vapor gerado é saturado, caso haja necessidade de se obter vapor superaquecido, deve-se instalar os superaquecedores. Estes são constituídos por feixes de tubos em forma de serpentinas, que podem ser de radiação ou convecção. Vale ressaltar que o uso de vapor superaquecido aumenta a eficiência energética do sistema e das turbinas (BEGA, 2003).

Para reduzir às perdas de energia são adicionados equipamentos de aproveitamento de calor como os economizadores e os pré-aquecedores de ar. Onde o primeiro reaproveita o calor residual dos gases de combustão para pré-aquecer a água da alimentação, evitando choques térmicos entre a água de alimentação e a existente na tubulação, e o segundo reaproveita os mesmos gases que passaram pelo economizador para pré aquecer o ar de combustão. (BEGA, 2003)

### **2.3.1.2. Caldeiras Flamotubulares**

Diferente das caldeiras aquotubulares, às caldeiras flamotubulares geram o vapor de uma forma simples e directa, mas não produzem vapor a pressões muito elevadas (NASCIMENTO JUNIOR; SARTORELLI, 2009). Estas caldeiras são o modelo mais antigo de caldeira onde São equipamentos derivados das caldeiras antigas, onde o fogo e os gases de combustão circulam no interior dos tubos e a água circula por fora (MARTINELLI JUNIOR, 1998). Nestas caldeiras, não é possível adicionar equipamentos de melhoria da eficiência energética, devido ao seu rearranjo, impedindo que a sua eficiência ultrapasse valores compreendidos entre 80-90% (BIZZO, 2012). A figura 7 apresenta um esquema deste tipo de caldeira.

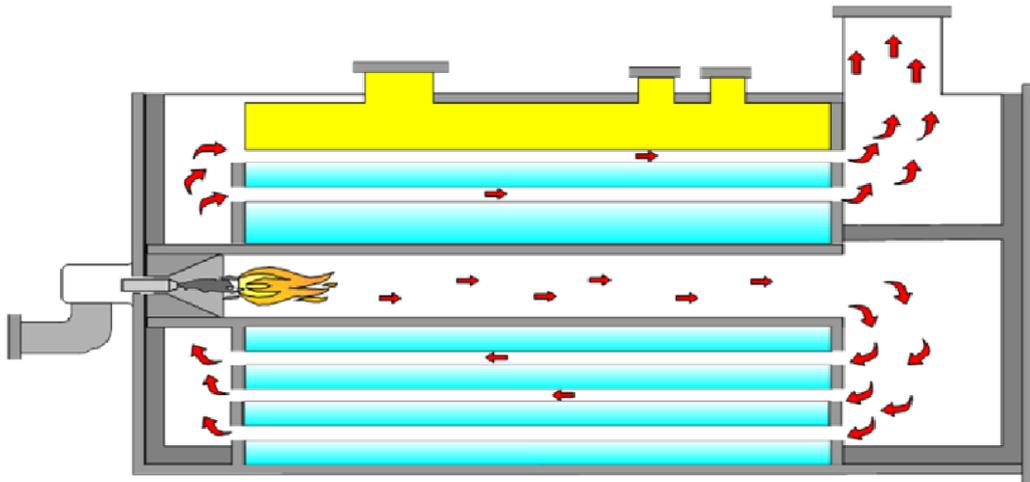


Figura 7: Gerador de vapor flamotubular, Fonte: Spirax Sarco (2005).

A caldeira flamotubular é geralmente utilizada nas indústrias de médio e pequeno porte (DUKELOW, 1991). Às figuras 8 e 9 representam às câmaras da caldeira flamotubular e seu retrato típico. Nestas caldeiras o vapor é gerado através da transferência de calor entre a água e às paredes metálicas dos tubos. O resfriamento dos gases é função da condutividade, da diferença de temperatura entre a água e os gases e da área dos tubos (BAZZO, 1992; BEGA, 2003; DA SILVA)

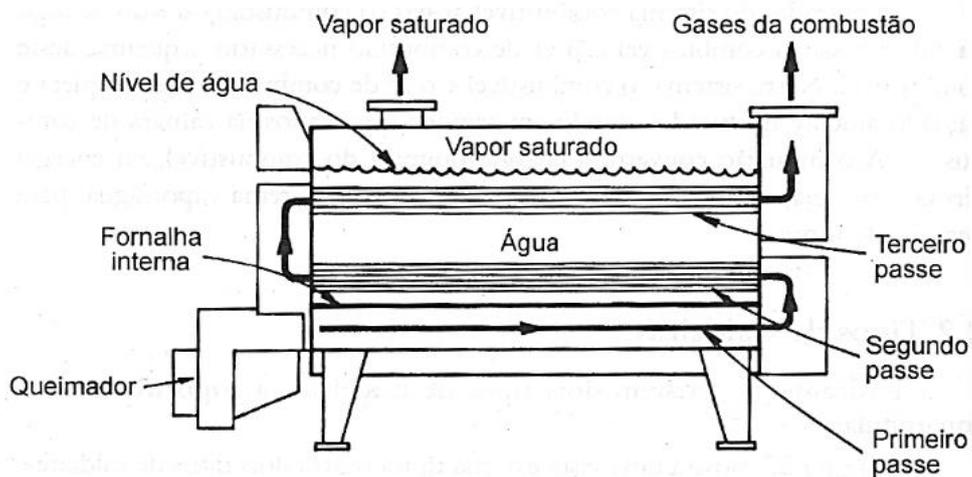


Figura 8: Esquema do interior de uma caldeira flamotubular com três passes e fornalha interna,

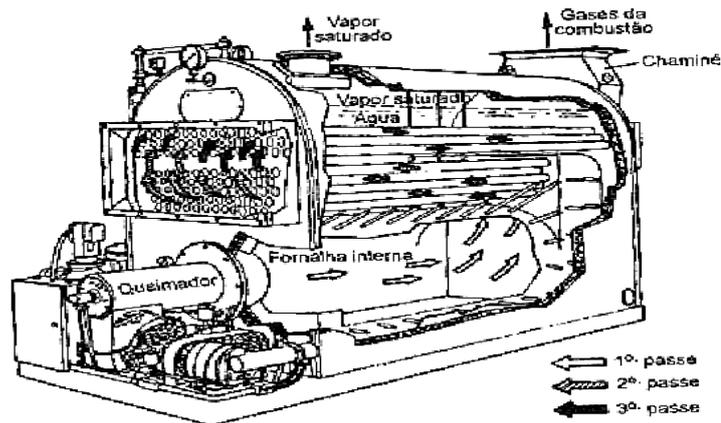


Figura 9: Caldeira flamotubular típica com três passes e fornalha interna. Fonte: BEGA, 2003

As caldeiras flamotubulares podem apresentar fornalhas internas ou externas. Às caldeiras de fornalhas internas (escocesas) são projetadas para queimarem óleo ou gás natural. Apresentam um rendimento, em torno de 84%, e são limitadas a pressões abaixo de 15 bar e produção de 15 T/h de vapor saturado, para obtenção de valores superiores é necessário dimensões exageradas. Sua construção é vulnerável a explosão, tornando-o menos competitiva que às caldeiras aquotubulares (BAZZO, 1992; DA SILVA, 2013).

Por outro lado, as que possuem fornalhas externas admitem a utilização de combustíveis sólidos, como o carvão e a lenha. A fornalha, é envolvida por paredes de água que garantem maior eficiência na queima do combustível. Actualmente às caldeiras flamotubulares estão sendo substituídas pelas aquotubulares (PERA, 1990).

### 2.3.1.3. Caldeiras Mistas

As caldeiras mistas surgiram devido a necessidade de se utilizar combustíveis sólidos em caldeiras de pequeno porte. Às caldeiras mistas apresentam uma eficiência inferior às aquotubulares e às flamotubulares, apesar de representar uma solução eficiente para queima de combustíveis sólidos a baixo custo (BIZZO, 2012) A Figura 10 apresenta um esquema típico das caldeiras mistas.

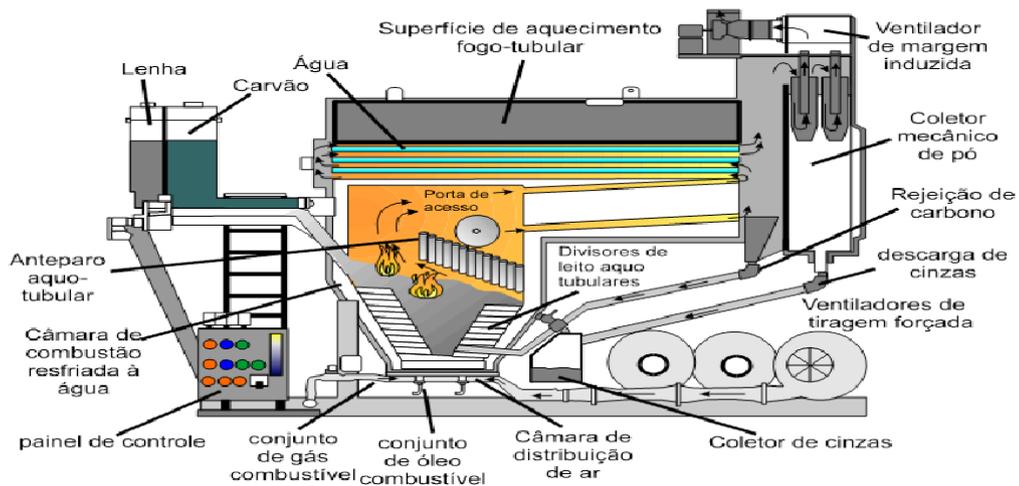


Figura 10: Gerador de vapor misto, Fonte: Spirax Sarco (2005).

Para a melhoria da eficiência energética e das condições de operação das caldeiras de grande capacidade são instalados alguns equipamentos como os mostrados na figura 11 (TROVARI, 2012).

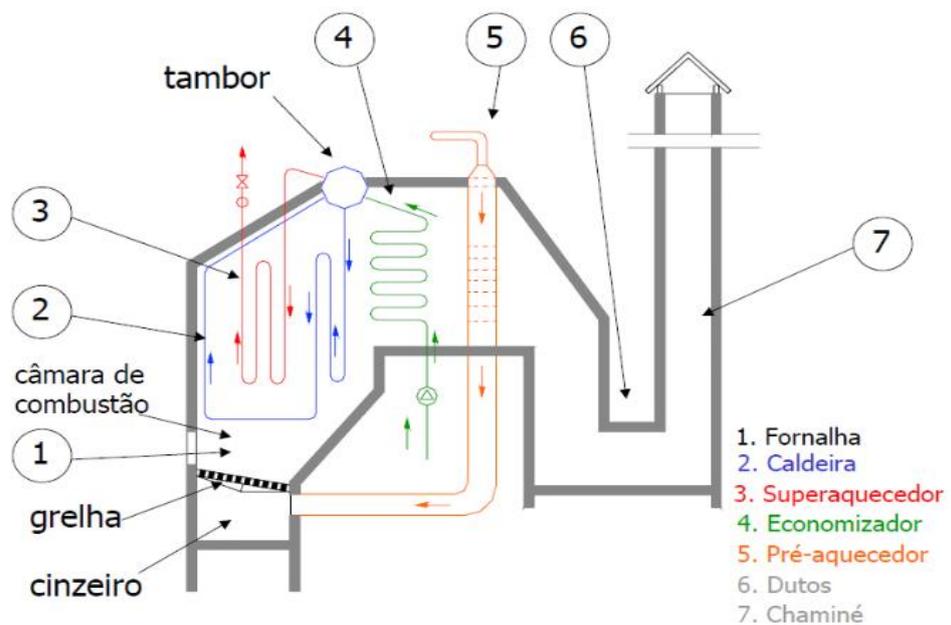


Figura 11: Acessórios instalados para melhorar o desempenho da caldeira.

O pré-aquecedor tem o objetivo de aquecer o ar de combustão para alcançar um melhor desempenho na transferência de calor por radiação. Tornando possível reduzir o consumo de combustível. O aquecimento é feito através do reaproveitamento do calor residual dos gases provenientes da combustão. Outro equipamento que pode ajudar na redução do consumo de combustível é o economizador. Como já descrito é um trocador de calor que pré-aquece a água de alimentação e também utiliza como fonte de calor os gases residuais provenientes da combustão. Além de melhorar o rendimento do sistema, sua instalação reduz o choque térmico (MARTINELLI JUNIOR, 1998; BIZZO, 2012; TROVATI, 2012; DA SILVA, 2013).

## 2.3.2. Perdas Na Casa De Caldeira

### 2.3.2.1. Calor Nos Gases Da Chaminé

Os gases da chaminé costumam ser uma das principais fontes de perda de calor no sistema de vapor. Apenas com um controle preciso é possível reduzir esse desperdício de energia e, conseqüentemente, diminuir os custos de produção. As perdas podem ser avaliadas pela temperatura dos gases ao saírem da caldeira. Temperaturas elevadas indicam baixa eficiência operacional da caldeira (SPIRAX SARCO, 2011). O melhor desempenho da caldeira é alcançado quando ocorrem trocas de calor eficiente entre os gases resultantes da combustão e o vapor. Os principais factores que influenciam o desempenho são (RODRIGUES, 2012; ELETROBRAS; 2005b):

- **Produção de vapor:** A carga da caldeira afeta directamente a temperatura dos gases de combustão. Quando a carga aumenta, a temperatura dos gases também aumenta. No entanto, a operação com uma carga baixa eleva as perdas por radiação nas superfícies e aumenta o excesso de ar, resultando igualmente em desperdícios. Pouco se pode fazer em relação a esse factor; o mais importante é monitorar a temperatura em função da carga para estabelecer um parâmetro de comparação.
- **Depositos nas áreas de transferência de calor:** Incrustações que obstruem as trocas térmicas podem estar presentes tanto do lado da água quanto do lado da combustão. Deve-se limpar periodicamente as superfícies para manter elevadas as taxas de transferência de calor e reduzir desperdícios. Na combustão, pode haver acúmulo da fuligem que actua como isolante térmico. No lado da água, a presença dos sólidos de cálcio, magnésio e sílica são os principais responsáveis pela barreira na troca de calor ocasionando grandes perdas. Portanto, a água captada deve ser tratada de forma eficaz para evitar a corrosão nas superfícies metálicas, e reduzir os custos de operação e manutenção (RODRIGUES, 2012).

### ***2.3.2.2. Excesso De Ar Na Combustão***

As reações de combustão envolvem a oxidação completa de um combustível, resultando na liberação de energia. Para que esta reação ocorra, é necessário ar, sendo que para garantir que todo o combustível se oxide, é preciso adicionar uma quantidade de excesso de ar. A maior parte dos processos industriais utilizam o ar ambiente como fonte de oxigênio para a combustão (BIZZO, 2012).

Um excesso de ar elevado é indesejável, pois reduz a temperatura da chama e aumenta as perdas de calor devido à entalpia dos gases efluentes, resultando em uma perda de eficiência na utilização do calor do combustível e na diminuição do comprimento da chama. E um excesso de ar reduzido pode levar a uma combustão incompleta e à formação de monóxido de carbono, bem como à produção de fuligem e fumaça, além de permitir o acúmulo de combustível não queimado, o que representa um risco de explosão (BIZZO, 2012; DALL'ORTO, 2012; CERON, 2010; CIBO, 1997). O excesso de ar é um factor indispensável na eficiência da combustão, ele controla o volume, a temperatura e a entalpia dos gases da combustão (PINHEIRO; VALLE, 1995; CERON, 2010).

O equilíbrio do excesso de ar deve ser baixo o suficiente para não comprometer a eficiência global da transferência de calor do combustível para o vapor, mas alto o suficiente para garantir a combustão completa do combustível. uma análise na temperatura e na concentração de oxigênio e de monóxido de carbono nos gases da chaminé determinará o valor óptimo do excesso de ar. Um desequilíbrio pode ser reconhecido pela presença excessiva de monóxido de carbono (CO) no gás de combustão e pela produção de fumaça preta (fuligem) ou pela presença de uma grande quantidade de oxigênio (PINHEIRO; VALLE, 1995; CERON, 2010; CIBO, 1997).

Pode-se aumentar a eficiência da caldeira em 1% a cada 15% de redução no excesso de ar (RODRIGUES, 2012; ELETROBRAS; 2005). Para além do melhor desempenho económico, operar com níveis ideais de excesso de ar assegura o cumprimento das normas ambientais. Como demonstrado pela figura 5, o excesso de ar influencia tanto a eficiência térmica quanto os níveis de emissão de poluentes (Cox, Sox, Nox) (PINHEIRO; VALLE, 1995; CERON, 2010).

*Tabela 5: Relação entre a eficiência da combustão, a temperatura dos gases da chaminé e o excesso de ar.*

<b>Eficiência da Combustão</b>						
<b>Excesso (%)</b>		<b>Temperatura do gás da chaminé menos a do ar de combustão (°C)</b>				
<b>Ar</b>	<b>Oxigênio</b>	<b>95</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>26</b>	<b>31</b>
	o		0	5	0	5
<b>9,5</b>	2	85,	83,	85,	78,	76,
<b>0</b>		4	1	8	4	0
<b>15,</b>	3	85,	82,	80,	77,	75,
<b>0</b>		2	8	4	9	4
<b>28,</b>	5	84,	82,	79,	76,	74,
<b>1</b>		7	1	5	7	0
<b>44,</b>	7	84,	81,	78,	75,	72,
<b>9</b>		1	2	2	2	1
<b>81,</b>	10	82,	79,	75,	71,	68,
<b>6</b>		8	3	6	9	2

*Fonte: Eletrobrás (2005b).*

### **2.3.2.3. Temperatura Da Água De Alimentação**

A temperatura da água de alimentação tem um impacto directo na eficiência da caldeira. Para vaporizar a água, é necessário que esta atinja a temperatura de saturação, para a qual uma determinada quantidade de calor deve ser cedida à água (calor sensível). Assim, quanto maior a temperatura da água de alimentação, menor será a quantidade de calor necessária para a vaporização. Com o aumento da temperatura da água no tanque de alimentação, também se pode alcançar maior estabilidade no sistema de vapor. Oscilações bruscas na temperatura podem resultar em interrupções na vaporização, dado que levará mais tempo para atingir o ponto de ebulição, além de causar choques térmicos devido a entrada de água a temperaturas mais baixas. Isso comprometerá o rendimento de todo o sistema, causando perdas de pressão e condensação na distribuição (SPIRAX SARCO, 2011). Outro factor relevante para manter a temperatura de

alimentação elevada é a quantidade de oxigénio livre na água. O oxigénio dissolvido é o parâmetro de maior importância para o controlo da corrosão no circuito de água de alimentação da caldeira (ASME, 2001). A relação entre a temperatura da água de alimentação e a quantidade de oxigénio dissolvido pode ser vista na Figura 12. Também deve ser verificada a possibilidade de utilizar produtos químicos a remoção do oxigénio livre.

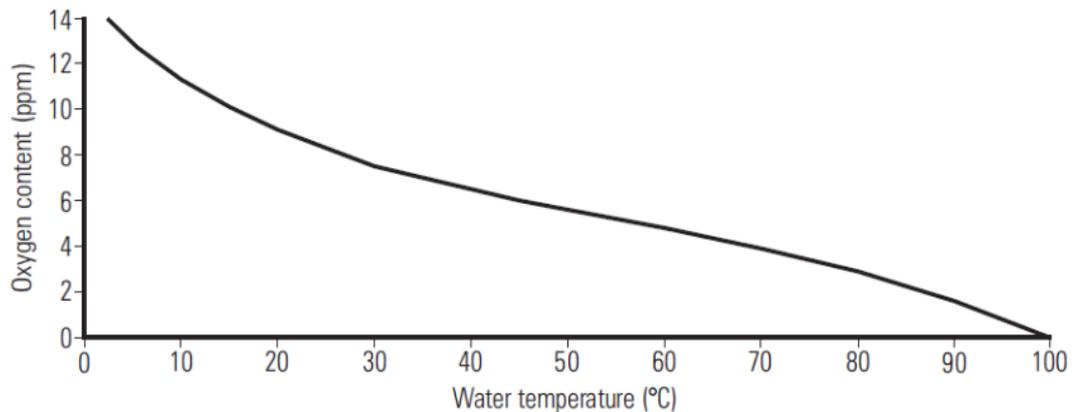


Figura 12: Relação entre o oxigénio livre e a temperatura da água. Fonte: Spirax, Sarco (2011):.

Existem várias formas de aumentar a temperatura da água de alimentação, incluindo (SPIRAX SARCO, 2011):

- Aumento do volume de retorno do condensado, mantendo a temperatura nas tubagens;
- Utilização de vapor flash proveniente das descargas de nível;
- Instalação de trocadores de calor na entrada do tanque de alimentação, que aproveite o calor sensível dos gases (economizador);
- Injecção de vapor vivo.

#### **2.3.2.4. Pré-Aquecedor De Ar**

A utilização de fluxos de calor residual como fonte de energia alternativa permite a redução de custos e aumenta a sustentabilidade do processo. Um exemplo disso é a recuperação do calor dos gases da chaminé para elevar a temperatura do ar utilizado na combustão do combustível (MARTINELLI JUNIOR, 1998; LEITE; MILITÃO, 2008).

A instalação do pré-aquecedor contribui para a diminuição da temperatura dos gases da chaminé, melhorando a eficiência da combustão e reduzindo o consumo de combustível (MARTINELLI JUNIOR, 1998; LEITE; MILITÃO, 2008).

Os gases da chaminé também podem ser usadas como uma fonte alternativa de energia na secagem de combustíveis sólidos húmidos (biomassa), através da injeção direta (ELETROBRAS, 2005b; RODRIGUES, 2012).

#### ***2.3.2.5. Transferências De Calor No Costado Da Caldeira***

Estas perdas são classificadas como transferências de calor por convecção e radiação, sendo impulsionadas pela diferença de temperatura entre o costado e a temperatura ambiente. A medição dessas perdas é muito complexa, entretanto, de um modo geral, estima-se que a energia perdida varie entre 1 a 4% (ELETROBRAS, 2005b).

Uma maneira de reduzir esse desperdício é melhorar o isolamento térmico ou realizar manutenção periódica do isolamento existente. O monitoramento de pontos quentes no costado pode sinalizar problemas no material refratário (RODRIGUES, 2012).

#### ***2.3.2.6. Calor Na Descarga De Superfície***

As descargas de superfície são realizadas sempre que a água na caldeira acumular sais minerais. O tratamento da água pode alterar quimicamente a forma dos sólidos totais dissolvidos (STD), mas não os remove completamente. Assim, para manter os níveis de STD baixos, são efectuadas descargas periódicas (ONOFRE, 2011).

Enquanto a caldeira produz vapor, os sais presentes na água de reposição acumulam-se; se as descargas não forem realizadas, existe o risco de arraste de água para o sistema de vapor, o que pode causar golpes de aríete, corrosão, incrustações nas superfícies, e redução do título do vapor (SPIRAX SARCO, 2011). O arraste de água acontece quando gotículas de água e de espuma são transportadas pelo vapor, e a presença de sais minerais no condensado pode indicar este fenômeno (RODRIGUES, 2012).

As descargas são controladas de forma manual ou automática. A automação dos processos de controlo garantem precisão, segurança e economia (ONOFRE, 2011; FIALHO, 2007). Monitorando o STD da água, é possível determinar o momento adequado para a descarga, que pode ser feito através de análises físico-químicas ou com um sensor de condutividade térmica

instalado na caldeira (SPIRAX SARCO, 2011). Quanto maior a condutividade da água, maior será o STD e, conseqüentemente, o número de descargas.

A vazão das descargas são determinadas pela equação (1) (RODRIGUES, 2012; HARREL, 1996). Uma parcela da água é descarregada a pressão atmosférica e se evapora, podendo ser utilizada como uma fonte de energia alternativa nos processos que permitem o uso de vapor de baixa pressão.

*Equação 1: descargas de fundo*

$$\%Descarga = \frac{STD * 100}{C - STD}$$

### **2.3.2.7. Calor Na Descarga De Fundo**

As descargas de fundo são uma parte essencial da operação da caldeira. Sem estas descargas, podem acumular-se depósitos de impurezas no fundo da caldeira, o que reduz as taxas de troca térmica. E a água descarregada representa uma fonte potencial de energia térmica, uma vez que se encontra à mesma temperatura e pressão que a caldeira (KROLL, 2008; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

Quando a água evapora na caldeira, os sólidos na água de alimentação são retidos e, devido ao seu peso, depositam-se no fundo. Para manter os níveis de impurezas dentro de limites aceitáveis, é necessário realizar descargas periódicas que durem alguns segundos a intervalos de várias horas (KROLL, 2008; CIBO, 1997). A qualidade da água de alimentação e ajuda a reduzir a necessidade de descargas (ELETROBRAS, 2005b).

Descargas excessivas podem levar a perdas de energia, água e custos de tratamento, enquanto descargas insuficientes podem resultar na formação de depósitos que prejudicam o desempenho do sistema. Vários factores devem ser considerados na optimização do número de descargas, e isto inclui o tipo de caldeira, a composição da água, e a pressão de operação. Geralmente, as taxas de descarga variam entre 4 a 8% do fluxo de água de alimentação (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000; CIBO, 1997).

Outro aspecto importante na optimização das descargas é a automação do sistema de controlo. A automação permite regular as taxas de volume das descargas em função da concentração de sólidos presentes, mantendo a composição química da água dentro de limites aceitáveis e minimizando as perdas de energia (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

Uma maneira de reduzir as perdas de energia térmica é recuperar o calor da água após a descarga. Uma solução simples e económica é utilizar um trocador de calor onde todas as descargas irão passar para pré-aquecer a água da alimentação. Em sistemas mais complexos, o reaproveitamento pode ser dado com a recuperação do vapor flash.

A economia gerada por sistemas de recuperação de calor das descargas é muito significativa, com a possibilidade de recuperar mais de 90% da energia utilizada no aquecimento da água descarregada. Estas economias podem resultar em projectos com um período de retorno inferior a um ano (KROLL, 2008; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

### **2.3.2.8. Calor Na Combustão De Biomassa Húmida**

Actualmente, existem programas de incentivo a nível mundial para a utilização de fontes alternativas de energia, como a biomassa como combustível (BARROS et al., 2004). O termo biomassa refere-se à matéria vegetal gerada através da fotossíntese e seus derivados, incluindo resíduos florestais e agrícolas, resíduos animais e a matéria orgânica presente nos resíduos industriais, domésticos e municipais (LORA; NOGUEIRA, 2003). A presença de humidade no combustível reduz o rendimento da combustão, uma vez que parte da energia liberada é consumida para a evaporação da água. A Tabela 6 ilustra a influência da humidade da lenha no poder calorífico inferior.

*Tabela 6: Influência da humidade no poder calorífico.*

<b>Humidade(%)</b>	<b>PCI (Kcal/Kg)</b>	<b>Humidade (%)</b>	<b>PCI (Kcal/Kg)</b>
<b>0</b>	<b>4438,3</b>	<b>45</b>	<b>2171,1</b>
<b>5</b>	<b>4186,4</b>	<b>50</b>	<b>1919,2</b>
<b>10</b>	<b>3934,5</b>	<b>55</b>	<b>1667,3</b>
<b>15</b>	<b>3682,6</b>	<b>60</b>	<b>1415,3</b>
<b>20</b>	<b>3430,7</b>	<b>65</b>	<b>1163,4</b>
<b>25</b>	<b>3178,8</b>	<b>70</b>	<b>911,5</b>
<b>30</b>	<b>2926,8</b>	<b>75</b>	<b>659,6</b>
<b>35</b>	<b>2674,9</b>	<b>80</b>	<b>407,7</b>

<b>40</b>	<b>2423,0</b>	<b>85</b>	<b>155,8</b>
-----------	---------------	-----------	--------------

**Fonte:** Eletrobras

O uso da biomassa como combustível traz múltiplos benefícios para o meio ambiente, contribuindo para a redução de custos com efluentes e aumentando a sustentabilidade do processo.

### **2.3.3. Rendimento Da Caldeira**

Os parâmetros do desempenho da caldeira, como eficiência e taxa de evaporação, podem diminuir com o tempo devido à redução da eficiência da combustão. Sujeira nas superfícies de transferência de calor, erros operacionais e falta de manutenção são factores que podem influenciar essa diminuição. Avaliações da eficiência da caldeira ajudam a identificar pontos de desvio no rendimento e, assim, a descobrir oportunidades para a conservação de energia (CIBO, 1997; SPIRAX SARCO, 2004). O custo do vapor é o índice de referência (benchmark) em programas de gestão de sistemas de vapor. Com este parâmetro, é possível obter uma visão clara de todos os aspectos económicos da geração de vapor (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2003).

#### ***2.3.3.1. Custo da Geração de Vapor***

De acordo com o Departamento de Energia dos Estados Unidos (2003), conhecer o custo real do vapor é importante por diversas razões, principalmente relacionadas com aspectos económicos, tais como:

- Avaliação adequada da eficiência do sistema e das oportunidades de melhorias. Se o custo calculado não for exacto, poderão ser rejeitados bons projectos para racionalizar o uso de energia;
- Base para a optimização do sistema de geração;
- Avaliação da produtividade e dos custos de produção.

Os factores que podem influenciar o custo incluem o tipo de combustível, o preço do combustível, a eficiência térmica da caldeira, a pressão de operação e a temperatura da água de alimentação (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000; CIBO, 1997).

As Tabela 7 e 8 apresentam a energia necessária para produzir um quilograma de vapor saturado a diferentes pressões de operação e temperaturas da água de alimentação e o conteúdo energético e a eficiência de combustão dos combustíveis mais utilizados na indústria

*Tabela 7: Energia necessária (kcal/kg) para gerar um quilograma de vapor saturado*

Pressão de operação (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Temperatura da água de alimentação da caldeira (°c)			
	40	70	90	120
10	627	599	571	543
30	632	604	576	548
40	630	602	574	547

Fonte: Eletrobras (2005)

*Tabela 8: eficiência da combustão de combustíveis comuns*

Tipo de combustível (unidade comercial)	Quantidade de energia (kcal/unidade comercial)	Eficiência de combustão
Gás natural (m <sup>3</sup> )	9.165	81.7
Óleo destilado n.2 (L)	9.230	84.6
Óleo residual n.6 (L)	9.960	86.1
Carvão (kg)	6.800	87.6

Fonte: Eletrobras (2005)

O custo do vapor (em \$/kg) pode ser calculado utilizando a equação (2). Para se obter um valor mais aproximado da realidade, é importante incluir nos cálculos os custos de operação e de instalação dos acessórios.

*Equação 2: Custo do vapor*

$$Custovapor = \frac{Custocombustivel * (Hv)}{PCi * \eta_{caldeira}}$$

#### **2.3.4. Eficiência Da Caldeira**

O grau de desvio em relação ao comportamento ideal pode ser determinado pela avaliação da eficiência. As perdas térmicas observadas em processos reais, onde se gera entropia, podem ser identificadas e minimizadas através do monitoramento do rendimento. Outro aspecto relevante é o económico, uma vez que toda perda resulta num aumento dos custos, devendo, por isso, ser minimizada para garantir sempre uma operação com eficiência máxima (CIBO, 1997; ELETROBRAS, 2005b).

A eficiência térmica da caldeira é a percentagem de calor que é efectivamente utilizada para gerar vapor. A determinação da eficiência da caldeira pode ser realizado pelo método directo ou pelo método indirecto (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000; HARRELL, 1996):

- Método directo: Neste método, a energia cedida ao vapor é comparada com a energia fornecida pelo combustível
- Método indirecto: a eficiência é determinada pela diferença entre as perdas totais e a energia admitida no sistema.

##### **2.3.4.1. Método Directo**

Este método é calculado pelo quociente entre a energia gerada pela caldeira na forma de vapor e a energia consumida no combustível. A energia do vapor é o produto entre a vazão massica do vapor e o ganho de entalpia observado na transformação da água de alimentação em vapor (ELETROBRÁS, 2005).

A eficiência da caldeira pelo método directo pode ser obtida através da equação (4). Para este cálculo, considera-se apenas a saída de vapor útil e o calor cedido pelo combustível. Para este cálculo deve-se monitorar os seguintes parâmetros (CIBO, 1997; BIZZO, 2012):

- 1-Quantidade de vapor gerado;
- 2-Quantidade de combustível utilizado;
- 3-Pressão de operação;

- 4-Temperatura da água de alimentação;
- 5-Tipo de combustível, para a determinação do poder calorífico.

*Equação 3: eficiência pelo método directo*

$$\eta_{caldeira} = \frac{\text{Calor útil vapor}}{\text{Calor cedido combustível}}$$

e

*Equação 4: eficiência da caldeira*

$$\eta_{MD} = \frac{\dot{m}v(Hv - ha)}{\dot{m}c(PCI)}$$

Onde:

Onde,  $\eta_{MD}$ - eficiência pelo método directo

$\dot{m}v$  - Vazão mássica de vapor [kg/s]

$Hv$  - Entalpia do vapor produzido [kJ/kg]

$ha$  - Entalpia da água de entrada [kJ/kg]

$\dot{m}v$ - Vazão mássica de combustível [kg/s]

PCI - Poder calorífico do combustível [kJ/kg]

#### **2.3.4.2. Método Indirecto**

Este método utiliza a soma das perdas da caldeira. A perda total de calor é obtida pela soma das perdas por transferência de calor e das perdas associadas aos fluxos que saem da caldeira, excluindo o fluxo de vapor. Diferente do método directo este produz um resultado mais preciso, visto que as perdas representam quase 10% do calor disponível (ELETROBRÁS, 2005; PINHEIRO et al, 1995).

Pelo método indirecto, é possível obter parâmetros mais próximos da realidade, uma vez que considera todas as perdas que ocorrem no sistema. As desvantagens do método directo podem

ser contornadas por este método. As perdas a considerar neste cálculo incluem as seguintes, juntamente com a equação para a obtenção dos seus respectivos valores (RODRIGUES, 2012; ELETROBRAS, 2005b; CIBO, 1997; HARRELL, 1996):

- *Equação 5: Perda pela chaminé*

$$q_1 = \dot{m} * Car * (T_{gas} - T_{ambiente})$$

- Perdas por radiação e convecção: Devido à complexidade dos cálculos envolvidos, geralmente se considera uma perda de 1 a 4%, dependendo da temperatura ambiente e do tipo de isolamento utilizado.

- *Equação 6: Perda na descarga de fundo*

$$q_3 = \dot{m}_{descarga} * C_{agua} * (T_{saturação} - T_{ambiente})$$

- *Equação 7: Perdas relacionadas à temperatura das cinzas*

$$q_4 = \dot{m}_{cinzas} * 1170$$

- *Equação 8: Perdas devido ao combustível não queimado*

$$q_5 = \dot{m}_{carbono} * 3370$$

Após a determinação das perdas, é possível determinar a eficiência da caldeira subtraindo essas perdas de 100%. Se a unidade das perdas for expressa em termos de energia por massa de combustível (kJ/kg), basta dividir o total das perdas pelo poder calorífico (PC) do combustível, conforme indicado pela equação 9.

*Equação 9: eficiência pelo método indireto*

$$\eta_{MI} = 1 - \frac{\sum \text{perdas}}{PC}$$

### 2.3.5. Consumo Ótimo De Combustível

Para a determinação da energia trocada entre o combustível e a água na fornalha, considera-se o calor a saída que corresponde a diferença de entalpia entre a água e o vapor à mesma temperatura. A equação (10) é usado para determinar o calor consumido pela água na sua conversão em vapor,

*Equação 10: calor consumido pela água para a conversão em vapor*

$$Q_s = m_v(h_v - h_a)$$

onde,

$m_v$  - Vazão do vapor em [kg/s]

$h_v$ - Entalpia do vapor [kJ/kg]

$h_a$  - Entalpia da água [kJ/kg]

O consumo ótimo do combustível é dado pela equação 11.

*Equação 11: consumo ótimo do combustível*

$$Comb = \frac{Q_s}{PCI}$$

## 2.4. Oportunidades De Conservação De Energia Na Distribuição De Vapor

Os sistemas de distribuição são responsáveis pelo transporte do vapor até os pontos de utilização através das linhas de vapor. E também regulam a entrega de vapor, portanto, devem responder às variações de temperatura e pressão requerida. Assim, um projeto cuidadoso de dimensionamento e manutenção frequente são imprescindíveis para um desempenho eficiente. A eficiência do sistema de distribuição é determinada pela sua capacidade de conduzir o vapor da caldeira até os pontos de utilização, minimizando as perdas térmicas. Os factores que contribuem para a redução das perdas nas linhas, incluem a drenagem adequada e o isolamento térmico. A drenagem eficiente assegura altas taxas de transferência de calor, enquanto um isolamento na espessura correta mantém o calor confinado nas tubulações, reduzindo a dissipação para o ambiente.

### 2.4.1. Dimensionamento De Tubulação

Segundo Zattoni (2008), um tubo é uma conducta fechada e oca, geralmente circular, destinado ao transporte de fluidos, enquanto a tubulação refere-se ao conjunto de tubos, conexões, válvulas e acessórios que formam a linha para a condução de fluidos.

As tubulações de vapor estão normalmente sujeitas a pressões de projecto e a variações significativas de temperatura, o que implica dilatações e contrações. Essa variação térmica exige uma análise da flexibilidade da rede, incluindo o uso de juntas de expansão. Para evitar corrosão e ferrugem, as tubulações devem ser preferencialmente fabricadas em aço carbono ou cobre. Além disso, o uso de isolamento térmico é indispensável, uma vez que minimiza as perdas de calor por radiação (TELLES, 1999).

O dimensionamento de uma tubulação para transporte de vapor deve ter um diâmetro que corresponda à sua vazão. Uma tubulação subdimensionada provoca um aumento da velocidade, o que pode resultar em maior desgaste, golpes de aríete, riscos de falta de vapor e cavitação. Entretanto, um diâmetro excessivo encarece o projecto com materiais e isolamentos desnecessários e aumentar a possibilidade de formação de condensado. Portanto, é fundamental encontrar um equilíbrio no projecto das tubulações (DAUMICHEN, 1975).

Existem dois critérios para o dimensionamento de tubulações: velocidade e perda de carga. Os cálculos baseados na velocidade consideram o volume específico do vapor e a área da tubulação, mas não levam em conta a extensão da tubulação, que, quanto mais longa for, menor será a pressão disponível no ponto de consumo. Para otimizar o aproveitamento do vapor, o método de perda de carga é mais indicado, pois fornece dados de pressão em qualquer ponto da tubulação (IBP, 1975).

Adotando um diâmetro inicial para os cálculos, o próximo passo é calcular a velocidade do fluido utilizando a equação 12.

*Equação 12: Vazão do fluido*

$$Q = \rho * v * A$$

onde,

Q - Vazão do fluido [kg/s];

$\rho$  - Densidade do fluido [kg/m<sup>3</sup>];

A - Área da tudo [m];

v - Velocidade do fluido [m/s].

Uma velocidade elevada implica uma maior perda de pressão devido ao atrito, aumentando a erosão das paredes do tubo e o ruído. O fluxo de vapor em um tubo resulta numa perda de pressão devido ao atrito entre o vapor e a parede, o que é visível na queda de pressão ao longo do tubo.

A equação 13 é a perda de carga de Darcy-Weisbach, que é a equação mais usada.

*Equação 13: Perda de carga de Darcy-Weisbach*

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g}$$

onde,

hf – perdas de carga por atrito

f - Fator de atrito de Darcy-Weisbach [adimensional]

L - Comprimento da tubulação [m]

v - Velocidade do fluido no interior do tubo [m/s]

g - Aceleração da gravidade do tubo [m/s<sup>2</sup>]

D - Diâmetro interno do tubo [m]

Para o fator de atrito foi utilizado a equação de Sousa Cunha-Maques de 1999,

*Equação 14: fator de atrito*

$$f = \frac{1,325}{\left[ \ln\left( \frac{k}{3,7 * D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Onde,

f - Factor de atrito;

Re - número de Reynolds [adimensional];

k - Rugosidade equivalente da parede do tubo [m];

*Equação 15: número de Reynolds*

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu}$$

no qual,

D - Diâmetro interno do tubo [m];

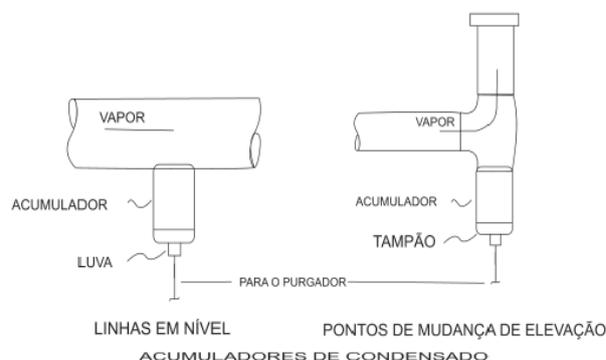
$\mu$  - Viscosidade dinâmica do vapor [m<sup>2</sup>/s]

$\rho$ -densidade do fluido (kg/m<sup>3</sup>)

#### 2.4.2. Purgadores

A utilização de purgadores ocorre em duas situações típicas (ELETROBRAS, 2005): para eliminar o condensado formado nas tubulações de vapor e para reter vapor nos equipamentos de aquecimento, permitindo a saída apenas do condensado.

Quando instalados em uma derivação da tubulação, os purgadores têm a função de drenar a linha de vapor. Essa derivação deve sair da parte inferior do acumulador de condensado (drip-pocket), pois o condensado deve fluir por gravidade para dentro do acumulador. A tubulação de entrada do purgador deve ser conectada diretamente ao fundo do acumulador. As figuras 13 e 14 ilustram a instalação de um purgador de drenagem (ELETROBRAS, 2005).



*Figura 13: esquema simples de Purgador para drenagem da linha de vapor. Fonte: ELETROBRÁS, 2006*

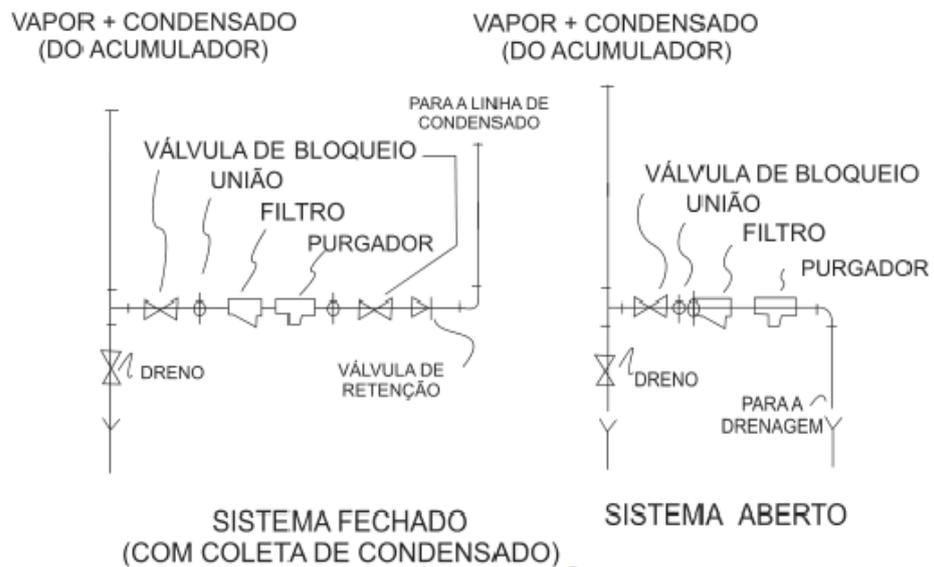


Figura 14: esquema complexo de purgador para drenagem da linha de vapor, Fonte: ELETROBRÁS, 2006

Os factores que determinam a escolha do tipo de purgador a ser utilizado incluem (LORA NOGUEIRA, 2003): pressão e temperatura do vapor na entrada do purgador; natureza da instalação e finalidade do purgador; pressão e temperatura do condensado; pressão na descarga do purgador; quantidade de condensado a ser eliminada; corrosividade ou erosividade do vapor ou condensado; facilidade de manutenção. Os purgadores de drenagem de condensado devem ser obrigatoriamente instalados nos seguintes pontos da tubulação de vapor, conforme indicado na figura 15 (ELETROBRAS, 2005):

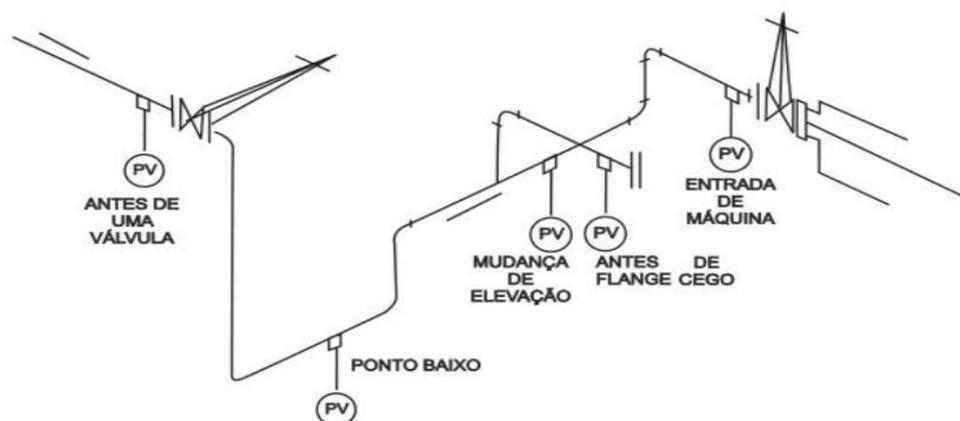


Figura 15: Pontos de colocação de purgadores para drenagem de condensado. Fonte: Eletrobras, 2006

Os pontos de colocação de purgadores segundo a Eletrobras (2005) incluem, todos os extremos (no sentido do fluxo) fechados com tampões, flanges cegos, entre outros; Em todos os pontos baixos e em todos os pontos de elevação; posicionados na elevação mais baixa; Em trechos de nível, deve ser instalado um purgador a cada 100 m a 250 m; quanto mais baixa for a pressão do vapor, mais purgadores devem ser colocados na linha; Antes de válvulas de bloqueio, válvulas de retenção, válvulas de controle e válvulas redutoras de pressão; neste caso, os purgadores são utilizados para eliminar o condensado que se forma quando a válvula está fechada. Próximo à entrada de qualquer máquina a vapor, para evitar a entrada de condensado na máquina.

Existem três tipos de purgadores, que diferem principalmente pela forma de acionamento: termostáticos, mecânicos e termodinâmicos (TELES, 1999).

Os purgadores termostáticos são aqueles acionados pela diferença de temperatura entre o vapor e o condensado e sensibilizados por um elemento termostático. Para que o condensado seja eliminado da linha, ele deve estar abaixo da temperatura de saturação, ou seja, os purgadores retêm o condensado até que perca todo o seu calor sensível (TELLES, 1999; PALACIOS, 2010).

Os purgadores mecânicos trabalham segundo a diferença de densidade entre o vapor e o condensado. Essa diferença provoca a movimentação de um elemento em um determinado sentido, controlando o orifício de descarga. Entre os purgadores mecânicos podemos encontrar os de boia livre, de balde aberto, de boia e alavanca e de balde invertido (TELLES, 1999; PALACIOS, 2010).

Por sua vez, os purgadores termodinâmicos baseiam-se no princípio da variação da pressão estática e dinâmica de Bernoulli em função da velocidade. Operam segundo a diferença de energia cinética entre o vapor e o condensado, ocorrendo em um disco que fecha a passagem devido a alta velocidade do vapor e abre devido a velocidade do condensado que é baixa (TELLES, 1999; PALACIOS, 2010).

### **2.4.3. Isolamento Térmico**

De acordo com Incropera et al. (2008), a troca de calor por condução ocorre devido à diferença de temperatura entre o vapor e o meio externo. A quantidade de calor que pode ser transferido é função do gradiente de temperatura do ambiente, da espessura presente na tubulação e da constante de condutividade térmica do material.

Em linhas de vapor com temperatura diferentes do ambiente, ocorrerão trocas de calor, o que afeta a temperatura do fluido e resultando numa perda de energia. Para mitigar esse fenômeno, costuma-se aplicar uma camada de material com baixa condutividade térmica sobre as superfícies

de troca de calor. Estes materiais são compostos por múltiplos espaços microscópicos preenchidos com ar, criando uma resistência à transferência de calor (MILCENT, 2006; SARTORELLI, 2009).

O isolamento térmico também contribui para a segurança no trabalho, visto que diminui a temperatura da superfície exterior da tubulação, diminuindo o risco de acidentes. Em termos de conforto térmico, o isolamento ajuda a reduzir a irradiação de calor no ambiente de trabalho (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

É fundamental que todas as superfícies que possam perder calor sejam isoladas, e isto inclui válvulas, conexões, tubulações, flanges, e outros componentes. A ausência de isolamento térmico ou um isolamento deficiente podem resultar em queima desnecessária de combustível e na formação de grandes quantidades de condensado, afetando a qualidade do vapor (IBP, 1975).

Algumas características que os isolantes devem apresentar são (MILCENT, 2006): resistência a altas temperaturas, não toxicidade, resistência mecânica e facilidade de aplicação.

A falta ou ineficiência do isolamento nos sistemas de distribuição de vapor e nas linhas de retorno de condensado representam uma fonte constante de desperdício de energia. A Tabela 9 apresenta as perdas de energia (W/ano) mais comuns em linhas de vapor sem isolamento térmico, onde foram considerados 100 metros de tubulação horizontal em aço, com temperatura ambiente de 24 °C e operação contínua durante 8760 horas/ano.

*Tabela 9: Perda de energia (Watts/ano) em 100 metros de tubulação sem isolamento.*

<b>Diâmetro do tubo (pol)</b>	<b>Pressão de vapor (bar)</b>			
	1	10	20	30
<b>1</b>	4.680,78	9.528,5	12.537,5	16.549,5
<b>2</b>	7.856,8	16.048	21.063	28.084
<b>4</b>	13.874,8	28.418,4	37.445,4	50.150
<b>8</b>	24.740,7	51.487,5	67.869,8	91.106
<b>12</b>	35.272,2	73.553,5	97.291,2	131.059

Fonte: U.S: Department of Energy (2000)

### 3. Metodologia

#### 3.1. Descrição da área de estudo

O estudo de caso foi realizado na Tongaat Hulett-Açucareira de Moçambique, S.A. (Açucareira de Mafambisse), localizada no Posto Administrativo de Mafambisse, Distrito de Dondo e província de Sofala, situada próxima ao rio Púngoè cerca de 50 km a noroeste de Beira como demonstrado pela figura 16, actuando há mais de 20 anos na produção de açúcar e se posiciona como uma das maiores fontes de receita do mercado local empregando cerca de 600 funcionários locais

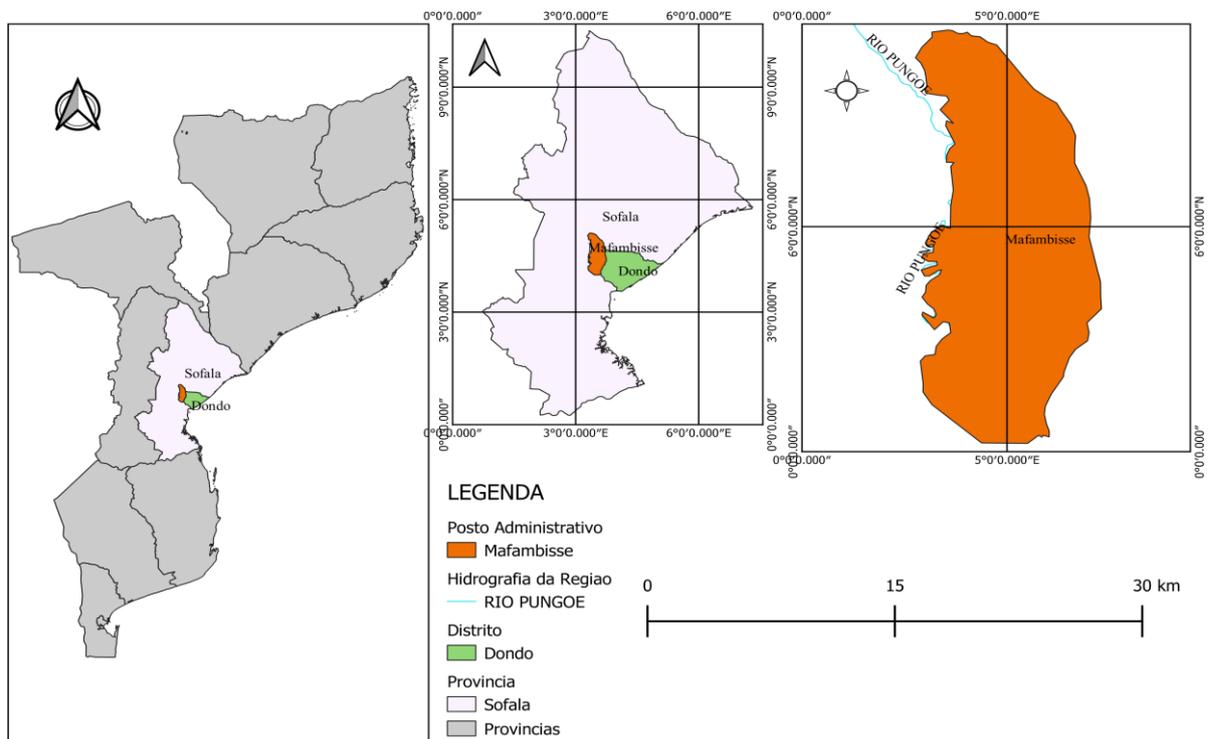


Figura 16- Localização da fábrica em estudo

Em relação a safra (campanha de produção), varia anualmente e depende da quantidade de cana disponível. A média anual vai de 5 a 7 meses. A Usina possui 6 ternos de moenda e a taxa média de moagem para cada safra da usina é aproximadamente de 170 toneladas de cana-de-açúcar por hora, o que constitui mais de 300 mil toneladas de cana moída no final da safra, com uma produção média de mais de 30 mil toneladas de açúcar

Entretanto, devido a necessidade de buscar a sustentabilidade fabril, tornou-se numa excelente oportunidade para diversificação dos produtos, e desse modo, a Açucareira de Mafambisse adotou a produção autossuficiente de energia, e o excedente é distribuído para as

habitações nas proximidades da fábrica. No final da safra, a energia que é distribuída pode chegar até aproximadamente 9 GW.

A açucareira de Mafambisse em estudo opera em 3 níveis de vapor diferentes: 30bar, 1,1 bar e -85kpa. Cada nível de vapor possui o seu respectivo ponto de aplicação sendo a central, os moinhos e o processo. O vapor é produzido através de três caldeiras que operam continuamente para gerar vapor para a fábrica.

Cada caldeira tem capacidade de queimar 16 toneladas por hora de bagaço, gerando 35 ton/h de vapor a 30,591 kgf/cm<sup>2</sup> e apresenta uma configuração aquatubular, perfazendo no total 48 ton/h de bagaço para gerar 105ton/h de vapor. Estas caldeiras têm como objetivos: recuperar o bagaço residual do processo de extração do sumo da cana e gerar vapor para alimentar Turbinas e outros departamentos da fábrica. Seu combustível é o bagaço da cana com uma percentagem de aproximadamente 50 % de humidade em média. Cada caldeira possui três entradas de ar e sopradores para forçar a remoção das partículas nos gases de combustão em quatro pontos principais: superaquecedor, convector, economizador I, e economizador II. O vapor gerado no processo é vapor saturado que é posteriormente enviado para os superaquecedores com o objetivo de tornar-lo vapor superaquecido. Esta região tubular localiza-se próximo a fornalha. Após o superaquecimento, o vapor é enviado para o coletor de 30,59 kgf/cm<sup>2</sup>. Do coletor, o vapor é reencaminhado para às turbinas da central eléctrica e das moendas, passando por válvulas redutoras e da turbina de contrapressão o vapor residual (vapor de escape) é enviado para as demais áreas da fábrica.

Os principais pontos de utilização de vapor na fábrica em estudo são:

- Vapor de 30,591 kgf/cm<sup>2</sup>: 2 Turbinas, uma de condensação e outra de contrapressão (Produção de Energia Elétrica);
- Vapor de 30,591 kgf/cm<sup>2</sup>: 5 Turbinas de contrapressão (geração de energia mecânica para as moendas);
- Vapor de 1,529 kgf/cm<sup>2</sup>: evaporadores;
- Vapor de -85Kpa: painéis de cozimento

### **3.2. Preparação Do Bagaço De Cana De Açúcar Como Combustível**

Na fábrica em estudo, a produção de energia ocorre em duas épocas cada com duração de 3 meses (campanha de produção) , sendo a primeira de abril a junho e a segunda de Agosto a outubro. A preparação do bagaço da cana está dividida em duas partes, nomeadamente: Produção

agrícola (produção da cana de açúcar) e Sector fabril (produção e geração de energia) As etapas da geração de energia descritas nesta metodologia, compreendem desde a produção agrícola até a geração de energia eléctrica na central.

### 3.2.1. Processo de produção agrícola (a cultura de cana-de-açúcar)

A Tongaat Hullet: Açucareira de Moçambique produz a cana-de-açúcar como principal fonte de matéria-prima para produção do açúcar e de seus derivados. As etapas de produção agrícola envolvem a preparação do solo, o plantio das mudas e o tratamento para prevenção contra pragas.

Após a maturação, a cana é colhida. Nesta fase eliminam-se às pontas e às folhas, e faz-se o carregamento. Esta fase é feita de forma semi-mecanizada, desde a limpeza do canavial, a queima, o corte manual e o carregamento.

A área de produção de cana-de-açúcar é extensa, no entanto, a que se destina para a campanha de produção é avaliada em 8.900 há, como demonstrado na tabela 10.

Tabela 10: Área de produção de cana-de-açúcar

<b>Campos</b>	<b>Área programada (ha)</b>	<b>Área em %</b>
<b>Mafambisse</b>	5.925	67
<b>Lamego</b>	2.440	27
<b>Pequenos produtores</b>	535	6
<b>Total</b>	8.900	100

Fonte: Tongaat Hulett - Açucareira de Moçambique (2022).

### 3.2.2. Obtenção Do Bagaço Da Cana

A obtenção do Bagaço da cana segue as seguintes etapas:

Etapa 1 - **Recepção da cana:** após a colheita, a cana é transportado em caminhões, até a mesa de alimentação, onde ela é pesada, amostradas e descarregada de forma mecanizada. A amostragem consiste na determinação do teor de Brix, pole e fibras.

Após a pesagem, a cana é introduzida na mesa de alimentação e segue para às facas primárias, secundárias e por fim o desfibrador, de forma a reduzir o colmo e permitir a

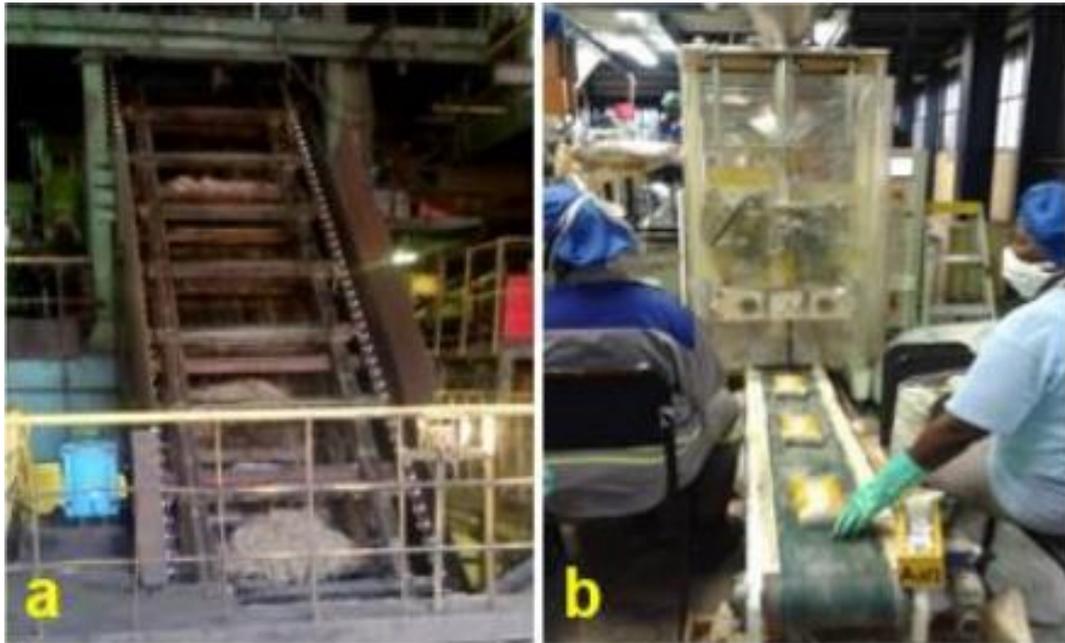
desintegração da estrutura primária inicial, após o desfibramento mede-se o índice de preparo da cana (PI), que varia de 90 à 92% . Este parâmetro mede o nível de desfibramento, caso esteja abaixo deste intervalo, a amostra não reuni requisitos para a moagem, caso se alcance este nível de PI a amostra segue para a extração. Nota-se que na açucareira em estudo a cana não passa pelo processo de lavagem. De forma a evitar excesso de água na cana, diferente das outras açucareiras no mundo.

**Etapa 2 - Extração do caldo:** Nesta etapa existem 6 ternos de moendas para a extração do sumo (caldo), sendo primeiro terno(moinho mãe) eléctrico e os restantes 5 movidos a vapor, que fazem esmagamento da cana por conjunto de cilindros metálicos(moendas)

Estes extraem aproximadamente 96,5% de sumo, sendo que quase 75% do sumo é extraído no primeiro moinho e os restantes 21% nos outros 5 moinhos. Para que a eficiência de extração seja elevada, realiza-se a embebição da matéria submetida a moagem, com adição de água no 6 moinho e adição do caldo no 2º ao 5º moinho. Às moendas são accionados por turbinas à vapor que converte a energia térmica do vapor em potência mecânica. Nesta etapa após passar pelo 6º moinho, determina-se a eficiência da extração e o bagaço é disponibilizado com humidade abaixo de 52% , o caldo extraído segue para o processo, para a produção de açúcar e o bagaço segue para a caldeira para a geração de vapor

O tratamento do sumo segue uma sequência estabelecida que inclui etapas de tratamento preliminar, composto por filtros rotativos para eliminação de impurezas residuais, adição de cal para clareamento do caldo e decantação. No processo de clarificação ocorre a eliminação de microrganismo, o aquecimento primário e secundário e no decantador ocorre a eliminação de sólidos solúveis (lama, fibra, óleo).

**Etapa 3 - Produção de Açúcar:** Após a clarificação, o caldo segue para os evaporadores com a finalidade de aumentar a concentração do sumo reduzindo 75% da percentagem de água, o produto efluente dos evaporadores é o Xarope. A seguir o Xarope é reencaminhado para o cozimento (cristalização), a centrifugação, a secagem, empacotamento, e armazenamento



*Figura 17-a) Moagem de cana-de-açúcar. b) Empacotamento do açúcar produzido*

### **3.2.3. Produção De Energia Eléctrica**

Na Tongaat Hulett - Açucareira de Moçambique, a geração de energia eléctrica é feita por intermédio do aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar gerado no processo de extração do caldo para a produção de açúcar. Este processo segue às seguintes etapas:

Etapa 1- **produção de vapor:** este inicia em 3 caldeiras aquotubulares localizadas na fábrica, seu combustível é o bagaço da cana com pequenas quantidades de carvão (no caso de bagaço húmido ou início da campanha) para melhorar a combustão ou dar início a combustão. O bagaço da cana resultante do 6º moinho, é transportado por intermédio dos elevadores de bagaço até a caldeira - figura 18.



Figura 18: Transportador (elevador) de bagaço.

Durante a combustão do bagaço, ocorre a liberação de gases inúteis que aumentam a temperatura da água até um máximo de 420°C a 30 bar. O vapor gerado é transportado em tubulações até a central eléctrica, sendo alimentado nas turbinas para a produção de energia.

Etapa 2- **produção de energia**: a produção de energia eléctrica é feita em 2 geradores com capacidade para produzir 9 MW de energia, sendo uma turbina, turbina 1, com capacidade de 3 Mwh e a outra, turbina 3, com uma capacidade de 6 Mgwh, ambas localizadas na central eléctrica (figura 19). A energia gerada é medida a cada 4h sendo que as 2 turbinas tem a capacidade de gerar 40,177Mwh de energia em cada 24h. A turbina 1 está obsoleta e tinha uma capacidade de 3Mwh.

Durante a combustão, o motor de ar induzido liberta gases inúteis, aumentando a temperatura da água até o máximo de 420° C, equivalente a 31 Bar, condições necessárias para fazer girar as turbinas e produzir vapor. Este por sua vez é transportado em válvulas de compressão até a central eléctrica, onde apenas é canalizado o vapor seco útil para produzir energia.



Figura 19- Central eléctrica da Tongaat Hulett

Durante a época de campanha, a energia elétrica produzida é usada para alimentar a fábrica, o sector administrativo; uma outra linha é usada para alimentar o Posto administrativo, bairros, e irrigação dos campos de produção da cana - tabela 11.

Tabela 11 : Produção anual de Energia

<b>Produção de Energia</b>	<b>Abril/Maio/Junho</b>	<b>Agost/Set/outubro</b>
<b>Energia gerada em MWh</b>	1364,4	8309,85
<b>Energia comprada em MWh</b>	3 923,200	2 875,20
<b>Energia usado na produção</b>	2 470,893	7 033,21
<b>Energia exportada para outros departamentos</b>	2 525,740	4 043,59
<b>Total</b>	10 284,233	25 028,80

Fonte: Tongaat Hulett : Açucareira de Moçambique (2022).

**Total de Energia gerada** = Energia gerada na I safra + Energia gerada na II safra

**Total de Energia gerada** = 1364,4 + 8309,85

**Total de Energia gerada** = 9674,25 MWh

O volume de energia que é gerado corresponde a 9674,25 MWh.

Segundo tabela 11, a maior parte da energia usada na fabrica provém da caldeira (8309,85 Mwh) e uma percentagem reduzida é fornecida pela Electricidade de Moçambique (cerca de 3,923.200). Esta energia é utilizada para irrigação dos campos de produção agrícola , bem como em outros departamentos excepto o moinho.

### 3.3. Quantidade De Combustível

O combustível usado para a produção de energia na Açucareira de Mafambisse é o bagaço bagaço, no entanto, em casos de carência ou de elevada humidade, são adicionadas outras fontes de energia, como o carvão e a lenha (tabela 12). A quantidade de bagaço a ser utilizado, depende do teor de fibra da cana e a humidade do bagaço.

*Tabela 12: Tipo de Combustível.*

<b>Tipo de Combustível</b>	<b>Abril/Maio/Junho</b>	<b>Setembro/outubro/novembro</b>
<b>Carvão utilizado para geração de energia) (ton)</b>	272,301	0,00
<b>Gás (usado como combustível para caldeiras) (kj)</b>	0,00	0,00
<b>Lenha (ton)</b>	0,00	0,00
<b>Toneladas de bagaço produzido</b>	21,477.980	49,848.47
<b>Toneladas de fibra exportados</b>	0,00	0,00
<b>Vapor produzido (ton)</b>	42,095.000	166,384.00
<b>Total</b>	63845.281	216234.47

Fonte: Tongaat Hulett - Açucareira de Moçambique (2022).

Durante cada campanha a fábrica pode produzir aproximadamente 3628.6 ton de açúcar moendo um total de 34,871.00 ton de cana, e conjugando às 2 épocas, a fábrica produz aproximadamente 28325.42 ton de açúcar moendo a 240046.24 ton de cana.

Nos primeiros meses da campanha (abril, maio e junho), foram produzidas aproximadamente 42,095.000 T vapor, enquanto que na segunda etapa (agosto, setembro outubro), foram produzidas aproximadamente 166,384ton de vapor, o que significa um aumento na

quantidade de energia gerada, e conseqüentemente maior utilização do bagaço comparativamente ao carvão e a lenha.

### 3.4. Determinação Das Propriedades Termo-Físicas Do Bagaço

A determinação das propriedades termo-físicas do bagaço consistiu em duas etapas descritas a seguir:

Etapa 1: **coleta e tratamento do bagaço** – esta etapa consistiu na coleta do bagaço resultante do sexto moinho e encaminhado ao DAC para posterior tratameto e análise.

Em seguida a amostra foi indroduzida nos digestores para o desfibramento e homogeinização da amostra como mostrado nas figuras 20 e 21.

A fim de realizar a análise da biomassa (bagaço), A determinação das propriedades termo-físicas do bagaço consistiu em duas etapas descritas a seguir:



*Figura 20-digestores*



*Figura 21 - amostras do bagaço antes e depois da homogeneização*

após a homogeneização pesou-se 2,5g e foi submetida a segunda etapa.

Etapa 2: **caracterização da amostra da Biomassa**- esta etapa consistiu na análise imediata com recurso a Termogravimetria (TGA), que é um equipamento constituído por uma balança de precisão cadinho de material inerte, forno, termopares e sistemas de gases como mostrado na figura 22.



*Figura 22- TGA acoplado ao infravermelho*

O método TGA para a determinação dos parâmetros termo-físicos consiste em aquecer a amostra da biomassa em um forno controlando a temperatura ou a taxa de aquecimento, em seguida mede-se e regista-se a variação de massa da amostra por intermédio de uma balança que fica conectada ao forno.

Utilizando o procedimento de análise desenvolvido por Saldarriaga ET al. (2015), a análise inicial é feita num ambiente neutro (atmosfera de nitrogênio) a  $20\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$  a uma taxa de aquecimento de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  até temperaturas próximas de  $105^{\circ}\text{C}$ , que foi mantida por 10min, removendo-se assim toda a humanidade presente na amostra. Em seguida, a amostra seca foi aquecida até uma temperatura de aproximadamente  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 30 min, para a remoção (queima) do material volátil. E na mesma temperatura, trocou-se o ambiente inerte para um ambiente com oxigênio e aqueceu-se por mais 30min, onde determinou-se a perda de massa que corresponde ao teor de carbono fixo. O material resultante da análise, constitui o teor de cinzas.

Neste processo obtém-se a análise imediata do material, o parâmetros da cinética da evaporação e a volatilização de seus compostos.

## 4. Análise De Dados E Discussão Dos Resultados

### 4.1. Determinação Das Propriedades Termo-Físicas Do Bagaço.

Utilizando os dados da análise imediata do combustível e os disponíveis sobre o bagaço de cana na literatura e aplicando a eles os equacionamentos propostos por Hugot e Cardero et al. (2001), obtemos os seguintes resultados.

*Tabela 13: Determinação da análise imediata do bagaço de cana de diversos autores.*

Referência		Humidade(%)	Carbono fixo(%)	Teor de Voláteis(%)	Cinzas(%)	PCS (MJ/Kg)
<b>Obtido</b>	Base seca	0	13	84	3	18,95
	Base humida	50	5,68	40	4,32	7,52
<b>Rein, 2007</b>	Base seca	0	12,95	87,06	livre	18,66
	Base humida	52	5,95	40,05	2	
<b>Camargo et al., 1992</b>	Base seca	0	13	83	4	18,90
<b>IPT,2007</b>	Base seca	0	13	83	1,9	18,90

<b>Manyà e Arauzo, 2008</b>	Base humida	2,2	17,8	74,98	5,02	
<b>Resende, 2003</b>	Base humida	9,24	8,4	88,67	2,93	

Da análise imediata na base seca observa-se na tabela 13 que 84% de voláteis, 3 % de cinzas e 13% de carbono fixo e estes parametros se encontram, dentro dos obtidos pela literatura. E para a humidade a fábrica queima combustível a 50% de humidade, o que lhe confere um PCS de 18,95Mj/Kg e PCI de 7,52Mj/Kg.

#### 4.2. Características nominais da caldeira e da tubulação de vapor

As tabelas 14 e 15 apresentam as características nomais da caldeira e da linha de distribuição de vapor em estudo.

*Tabela 14: características nomais da caldeira*

<b>Fabricante</b>	<b>BABCOX &amp; WILCOX</b>
<b>Capacidade de evaporação</b>	36 Ton/h
<b>Tipo de circulação</b>	Natural 3 passos
<b>Pressão de vapor</b>	30 bar
<b>Pressão de projecto</b>	33,2 bar
<b>Temperatura de vapor superaquecido</b>	420 °C
<b>Temperatura do ambiente</b>	32° C
<b>Temperatura de saída do pré-aquecedor</b>	100° C
<b>Qualidade do vapor produzido</b>	Saturado
<b>Qualidade do vapor distribuído</b>	Superaquecido
<b>Equipamento de queima</b>	3 alimentadores

<b>Combustível</b>	Bagaço da cana
<b>Ano de fabric</b>	1974

*Tabela 15: Table 6: características nomais da linha de distribuição de vapor*

	<b>Central eléctrica</b>
<b>Diâmetro interno (m)</b>	0.6-0,7
<b>Comprimento (m)</b>	120
<b>Caudal de vapor (kg/s)</b>	12,22
<b>Pressão no receptor (bar)</b>	26-30
<b>Qualidade do vapor</b>	Superaquecido
<b>Tipo de Isolamento</b>	Sem isolamento

Das tabelas pode-se verificar que a caldeira utilizada pela empresa tem uma capacidade de trabalho máximo de 33,2 kgf/cm<sup>2</sup> porém, actualmente, a mesma trabalha com uma pressão de 30 kgf/cm<sup>2</sup>. De acordo com os dados operacionais, com essa pressão, a vazão de vapor superaquecido a 420°C é de 105 ton/h. no entanto devido as exigências dos pontos de recepção apenas 44ton/h chegam para a central eléctrica sendo 25ton/h descarregados em sistemas de purga que se encontram nas proximidades da turbina.

A linha de vapor em estudo esta dividida em 2 secções: I-caldeira até o ponto de separação (saída bilateral), onde apresenta 0,7 m de diâmetro e 60 m de comprimento e II- Ponto de separação até a turbina da central eléctrica, com 0,6m de diâmetro e 60m de comprimento. A pressão no receptor varia de 26 a 30 bar com um caudal de vapor de 12,22Kg/s, e sem isolamento térmico.

### 4.3. Eficiência Da Caldeira Pelo Método Directo

De acordo com os dados disponíveis tem-se os seguintes resultados:

Eficiência da caldeira considerando apenas a produção do vapor saturado,

$$\eta \approx 79\%$$

A Eficiência global da caldeira :

$$\eta_G \approx 91\%$$

Segundo o manual da caldeira a eficiência óptima das caldeiras varia entre 82-95% demonstrando que a caldeira numero 2 operaria abaixo das normas no caso da produção apenas de vapor saturado.

O valor da eficiência global leva em conta os mecanismos de melhoria da eficiência energética elevando assim a eficiência da caldeira em estudo para valores dentro do recomendado pelo manual da caldeira.

#### **4.4. Taxa De Evaporação E Consumo Óptimo De Combustível**

A taxa de evaporação actual na fábrica é de 2,2 kgvap/kgcomb com um consumo de combustível de 4,4 ton/h.

No entanto para um consumo de combustível óptimo de 3,49 ton/h a taxa de evaporação se eleva para *2,76kgvap/kgcomb*

#### **4.5. Avaliação Das Perdas De Carga Na Linha De Vapor**

Para analisar as perdas que ocorrem na linha de vapor em estudo, primeiramente foram recolhidos alguns dados primários para o cálculo da perda de carga que está ocorrendo no momento e para efeito de cálculos, a tubagem foi dividida em 2 secções devido a configuração da instalação tendo sido avaliada as perdas que iriam ocorrer em determinados diâmetros e que estão ocorrendo. Onde foram obtidos os seguintes resultados:

- Seção I - caldeira até o ponto de separação (saída bilateral)

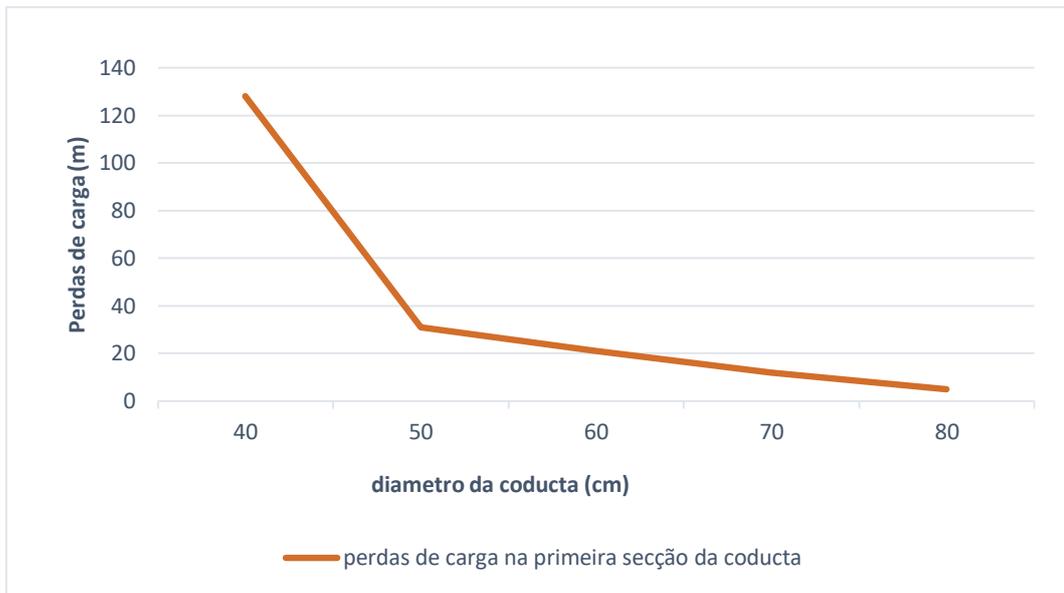


Figura 23: Perdas de carga na primeira seção da tubulação

- Seção II - Ponto de separação até a turbina da central eléctrica

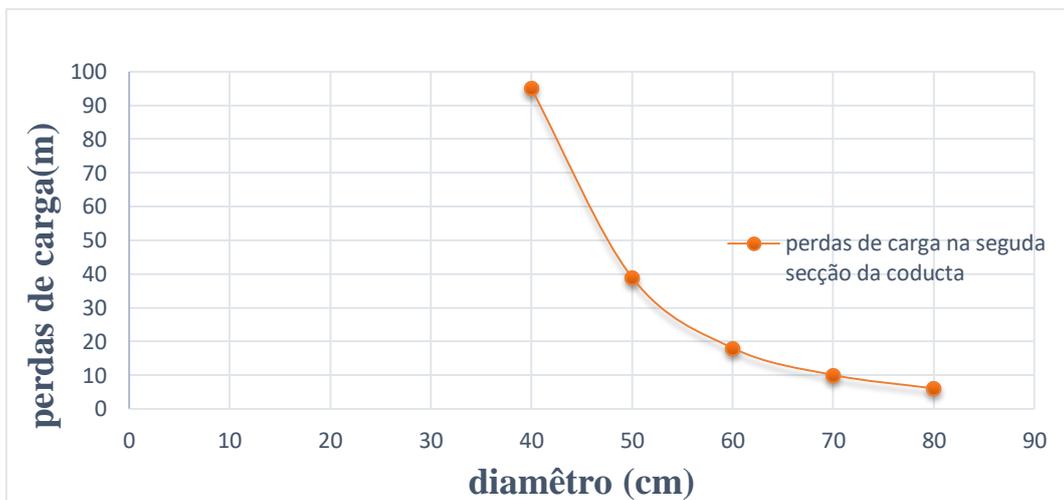


Figura 24: Perdas de carga na segunda seção da tubulação

Das figuras 23 e 24 verifica-se que as perdas de carga variam inversamente com o diâmetro, e na primeira seção da tubulação para as condições actuais de instalação da empresa ( $d=70$  m) as perdas são de aproximadamente 11,5 m, um equivalente a 1,1 bar e com uma velocidade de vapor de 7,84 m/s, velocidade dentro do recomendado pelo manual da caldeira para tubulações de vapor superaquecido na gama de temperatura e pressão de operação da empresa e na segunda seção da

tubulação para as condições actuais de instalação da empresa ( $d=50$  m) as perdas são de aproximadamente 39 m, um equivalente a 3,86 bar e com uma velocidade de vapor de 10,199 m/s. Actualmete a empresa opera com um valor de perdas de carga de 4,96 bar, considerando apenas as condições de instalação, e este valor reduz a pressão de vapor para um valor abaixo do exigido nas turbinas ( $P < 26$  bar)

As perdas de carga que chegam na secção final da central são determinadas pela perda total na tubulação desde a caldeira até o ponto de recepção (central electrica) como é demonstrado no apêndice.

#### 4.6. Avaliação das perdas térmicas devido a falta de isolamento na linha de vapor

Para efeito de cálculos, a tubagem foi dividida em 2 secções devido a configuração da instalação tendo sido avaliada as perdas que estão ocorrendo nas duas secções. Onde foram obtidos os seguintes resultados:

*Tabela 16: perdas de energia devido a falta de isolamento*

<b>Secção</b>	<b>Diâmetro interno (m)</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Perdas térmicas (W/m)</b>
<b>I secção</b>	0,7	0,02	27944
<b>II secção</b>	0,5	0,02	6669,8
<b>Total</b>			34613,8

Da tabela 16 observa-se que as perdas de energia devido a falta de isolamento é muito elevada principalmente na primeira secção onde atravessam maiores quantidades de vapor, tendo como perda de energia um valor próximo de 27944W/m e perfazendo um total de 16,78Mw de energia desperdiçada devido a falta de isolamento apenas na primeira secção da tubulação e um total de 34,61kW/m para as duas secções.

#### 4.7. Proposta De Solução De Conservação De Energia

De forma a reduzir os desperdícios de energia devido as condições fluido-dinâmicas de escoamento bem como devido a falta de isolamento foi proposto um sistema com isolamento térmico de lã de vidro com a seguinte configuração do sistema de distribuição de vapor:

*Tabela 17: Configuração proposta para o sistema de distribuição de vapor*

<b>Secções</b>	<b>Diâmetro interno (m)</b>	<b>Diâmetro externo (m)</b>	<b>Espessura de isolamento (m)</b>
<b>Primeira secção</b>	0,7	0,74	0,4
<b>Segunda secção</b>	0,6	0,64	0,4

*Tabela 18: Comparação das perdas nas duas configurações do sistema de distribuição de vapor*

<b>Secção</b>	<b>Primeira novo</b>	<b>Primeira anterior</b>	<b>Segunda novo</b>	<b>Segunda anterior</b>	<b>Total novo</b>	<b>Total anterior</b>
<b>Diâmetro interno (m)</b>	0,7	0,7	0,6	0,5	(0,7-0,6)	(0,7-0,5)
<b>Comprimento (m)</b>	60	60	60	60	120	120
<b>Espessura de isolamento (m)</b>	0,4	Sem isolamento	0,4	Sem isolamento		
<b>Perdas de carga (m)</b>	1,1	1,1	1,7	3,86	2,8	4,96

<b>Perdas de energia (MW)</b>	134,7	1676640		400188		4153656
<b>Redução as perdas de energia (%)</b>	99,5		<99,9			

Para o sistema em estudo os resultados demonstram que uma linha de vapor com diâmetro entre 0,7 (primeira secção ) e 0,6 ( segunda secção) garantem perdas de carga mínima o suficiente para reponder as exigências do ponto de recepção e com isolamento de lã de vidro com espessura de 0,4 m reduzem sigficativamente as perdas de energia devido a falta de isolamento como demonstrado nas tabelas 17 e 18.

## 5. Conclusão

Após uma coleta e análise criteriosa dos dados junto a caldeira e a tubulação de vapor com o intuito de avaliar a eficiência energética da caldeira e da linha de vapor para obter valores quantitativos das perdas como base de uma solução de conservação e gerenciamento de energia no sistema em estudo, conclui-se que a análise imediata da Biomassa do bagaço da cana utilizada na fábrica apresenta pouca variabilidade em relação aos encontrados pela literatura e a humidade do bagaço se encontra dentro do recomendado por Hugot.

No sistema de geração de vapor verifica-se que a fábrica opera com uma caldeira abaixo do recomendado pela norma para a produção de vapor saturado, no entanto, como o a fábrica objectiva a produção de vapor superaquecido devido as exigências dos pontos de recepção, os mecanismos de melhoria da eficiência energética como o superaquecimento do vapor, o pré-aquecimento da água da alimentação e o retorno do condensado, tem sido usados de forma eficiente, tal que, o sistema consegue fornecer padrões de vapor de acordo com os exigidos pelos pontos de recepção, porém, algumas práticas, como o uso do caudal óptimo de combustível, podem ser utilizadas de forma a minimizar a quantidade de combustível a ser queimado e o seu impacto ambiental, e consequentemente reduzir os custos na produção do vapor.

E nos sistemas de distribuição, o sistema em estudo opera no limiar do recomendado, com perdas de carga elevadas o suficiente para reduzir a eficácia dos sistemas de utilização nos pontos de recepção, fazendo com que os sistemas de utilização operem com padrões de vapor fora do recomendado pelo fabricante, no entanto, com a nova proposta de solução que implica unicamente na redução do diâmetro na segunda secção as perdas devido as condições fluidodinâmicas tornam-se desprezíveis diante do padrão de vapor recomendado e exigido nos pontos de utilização e com o dimensionamento do isolamento de lã de vidro temos uma redução em mais de 95% de energia desperdiçada no sistema na forma de calor.

Sob o ponto de vista de auditoria energética este sistema conclama por programas sistematicos de inspecção e melhoria nos sistemas de geração e distribuição de vapor.

### 5.1. Recomendações

Para trabalhos futuros recomenda-se:

O estudo da eficiência energética pelo método indirecto e uma avaliação técnica e económica do isolamento ideal para garantir valores mais precisos de eficiência energetica.

## 6. Referências bibliográficas .

ASME. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Boiler and Pressure Vessel Code; Recommended Guidelines for the Care of Power Boilers.** Section VII. New York, 2009.

BABCOCK & WILCOX. **Steam: Its Generation and Use.** New York: Babcock & Wilcox, 1985

BARRIGA, Alfredo. **Auditoria energética de um sistema de vapor.** Ministério de Energia: Direcciona de energia Alternativa y Eficiencia Energeticos. Equador, 2012

BARROS, Robledo W.; ARADAS, Maria E. C.; COBAS, Vladimir R. M.; LORA, Electo E. S. **Uso de biomassa como combustível para accionamento de motores stirling.** In: 5º Agrener - Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída. Campinas, 2004

BAZZO, E. **Geração de Vapor** / Edson Bazzo. 2 ed. – Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995.

BEGA, E.A., **Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras.** Rio de Janeiro, RJ, 2003.

BCS, Incorporated. **Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry.** U.S. Department of Energy. 2008. 112p.

BIZZO, Waldir A. **Geração, distribuição e utilização de vapor.** Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP1.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2023.

BRASIL. **Ministério do Trabalho.** Portaria nº 23, de 27 de dezembro de 1994. Norma Regulamentadora nº 13 (NR-13) para caldeiras e vasos de pressão. Brasília, DF, 1994.

CAPEHART, Barney. L.; SPILLER, Mark B.; FRAZIER, Scott. **Energy Management Handbook.** 6 ed., Lilburn: The Fairmont Press, 2006.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica.** 5 ed. São Paulo: McGraw Hill, 2007.

CERON, Luciano P. **Controle do excesso de ar em processos de combustão.** Revista Meio Filtrante, v.44, 2010.

CIBO. COUNCIL OF INDUSTRIAL BOILER OWNERS. **Energy Efficiency Handbook.** Warreton, VA: CIBO, 1997

DALL'ORTO, Gibson. **Geradores de vapor**. Apostila CEFETS. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABhtQAL/5152-apostila-vapor-cefetes>>. Acesso em: 10 dez. 2023.

DAUMICHEN, Ricardo V. H. **Curso sobre distribuição de vapor**. Instituto Brasileiro de Petróleo, 1975.

DANTAS, E. **Geração de Vapor e Água de Refrigeração: Falhas - Tratamentos - Limpeza Química**. Rio de Janeiro : José Olympio, 1988

DA SILVA, Andressa **conservação e gerenciamento de energia em sistemas de vapor**. Trabalho de conclusão de curso de Tecnologia e Engenharia de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. campo mourão, 2013

DUKELOW, S. G. **The Control of Boilers**. International Society of Automation. 2. ed. 1991.

Manual Prático: **Eficiência energética no uso de vapor**. ELETROBRAS Centrais Elétricas Brasileiras, Rio de Janeiro, 2005b

ENSINAS, A. V.; ARNAO, J. H. S.; NEBRA, S. A. **Increasing Energetic Efficiency In Sugar, Ethanol, and Electricity Producing Plants**. p.583-600. In Luis Augusto Barbosa Cortez (Coord.). Sugarcane bioethanol — R&D for Productivity and Sustainability, São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2014

FERNANDES, Fabiano A. N.; PIZZO, Sandro M.; MORAES JUNIOR, Deovaldo. **Termodinâmica Química**. Ceará: UFC, 2006.

FIALHO, Arivelto. B. **Instrumentação industrial: conceitos, aplicações e análises**. São Paulo: Érica, 2007.

FISCHER, James R.; BLACKMAN, Jordan E.; FINNELL, Janine A. Industry and Energy: Challenges and opportunities. **Engineering & Technology for a Sustainable World**, n.4, p. 8-9, 2007.

Global Product Prices. **South Africa Sugar price,2022**. Obtido em 1 de Maio de 2024, de Global Product Prices: <https://www.globalproductprices.com>

HARRELL, Greg. **Steam System Survey Guide**. Washington, DC: U. S. Department of Energy, 1996.

<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>

IBP. INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO. **Curso sobre distribuição de vapor**. Rio de Janeiro: IBP, 1975.

INCROPERA, Frank. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

KROLL, Ryan. **Boiler blowdown heat recovery**. Milwaukee, WI: Michaels Engineering, 2008.

LEITE, Nilson R.; MILITÃO, Renato A. **Tipos e aplicações de caldeiras**. Programa de Mobilização da Indústria Nacional de Petróleo e Gás Natural: Prominp. São Paulo, 2008.

LORA, Electo E. S.; NOGUEIRA, Luís A. H. **Dendroenergia Fundamentos e Aplicações**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

MARTINELLI JUNIOR, Luiz C. **Geradores de Vapor – Recepção, Operação e Medidas de Segurança**. Cadernos UNIJUÍ, Série Tecnologia Mecânica, n.8. Ijuí, RS: Editora Unijuí, 1998.

MILCENT, Paul Fernand. **Noções de Isolamento Térmico de Tubulações**. Curitiba: UFPR, 2007.

Ministry of Industry and Commerce (MIC). Interview held on May 27, 2022 in Maputo.

Mozambique Sugar Producers' Association (APAMO). Interview held on April 28, 2022, in Maputo.

NASCIMENTO JUNIOR, Cleber M.; SARTORELLI, Ricardo J. **Geração de energia por meio do vapor**. Coletânea de trabalhos – Qualidade de energia e tecnologias de uso final, n.2, p.13-17, 2009.

NETO, V. C.; RAMON, D. **Análises de opções tecnológicas para projetos de co-geração no sector sucroalcooleiro**. Vibhava Consultoria S.A.Ltda–Sustainable Energy Technology Assistance Program (SETAP) Brazil Representation, Brasília, 2002.

ONOFRE, Reginaldo M. **Mecatrônica Atual – Automação Industrial de Processos e Manufatura: Automação em caldeiras: Válvulas de descarga de fundo e de nível**. Tatuapé, SP.: Saber, 2011.

PALACIOS, José L. **Técnicas de gestión energética en sistemas de vapor**. Laboratorio de energías alternativas y eficiencia energética – Escuela Politécnica Nacional. Quito, 2010.

PERA, H. **Geradores de vapor**. Editora Fama, 2a Edição, 1990

PINHEIRO, Paulo C. C.; VALLE, Ramom M. **Controle de combustão: otimização do excesso de ar**. In: II Congresso de equipamentos e automação da indústria química e petroquímica. Rio de Janeiro, 1995.

RODRIGUES, Marcos L. M. **Curso Eficiência Energética em Sistemas de Vapor**. DATTE: Educação & Treinamento. Belo Horizonte, 2012.

RUSSEL, John B. **Química Geral**. São Paulo: Makron, 2008.

SARTORELLI, R. J.; NASCIMENTO JUNIOR, C. M. **Geração de energia por meio de vapor**. Coletânea de trabalhos - Qualidade de energia e tecnologias de uso final, n.2, p.13-17, 2009.

SPIRAX SARCO. **Design of Fluid Systems - Hook Ups**. Blythewood, SC: Spirax Sarco, 2000.

\_\_\_\_\_. **Design of Fluid Systems: Steam Utilization**. Blythewood, SC: Spirax Sarco, 2004.

\_\_\_\_\_. **Curso de Projetos de Sistema de Vapor**. Blythewood, SC: Spirax Sarco, 2005.

\_\_\_\_\_. **The Steam and Condensate Loop Book**. Blythewood, SC: Spirax Sarco, 2011.

TELLES, Pedro C. S. **Tubulações Industriais**. 9 ed. Rio de Janeiro: S. A, 1999.

TROVATI, Joubert. **Tratamento de água para geração de vapor: caldeiras**. Disponível em: <[http://www.snatural.com.br/PDF\\_arquivos/Torre-CaldeiraTratamento-Agua.pdf](http://www.snatural.com.br/PDF_arquivos/Torre-CaldeiraTratamento-Agua.pdf)>. Acesso em: 12 dez. 2023.

U. S. DAPARTAMENT OF ENERGY. **Steam Trap Performance Assessment**. Washington, DC: Advanced Manufacturing Office, 1999.

\_\_\_\_\_. **Improving Steam System Performance: A Sourcebook for Industry**. Washington, DC: Advanced Manufacturing Office, 2000.

\_\_\_\_\_. **Best Practices: Steam Overview**. Washington, DC: Advanced Manufacturing Office, 2002

\_\_\_\_\_. **How To Calculate The True Cost of Steam**. Washington, DC: Advanced Manufacturing Office, 2003.

\_\_\_\_\_. **Improving Steam System Performance: A Sourcebook for Industry**. Washington, DC: Advanced Manufacturing Office, 2004.

USAID. (2015). Açúcar em Moçambique: **Equilibrar Competitividade com Proteccionismo**. Agência dos Estados Unidos para o Desenvolvimento Internacional .

VAN WYLEN, Gordon J.; SONNTAG, Richard E.; BORGNAKKE, Claus. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1995.

WANG, Lijun. **Food Efficiency and Management in Food Processing Facilities**. London: CRC Press, 2008.

ZATTONI, Célio Carlos. **Materiais para tubulação**. FATEC-SP, 2008

## Apêndice

### Eficiência da Caldeira pelo método directo

A eficiência através deste método, pode ser avaliada na base PCI, por meio da equação

$$\eta = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_a)}{\dot{m}_c \cdot pci}$$

$\dot{m}_v$  = Fluxo de vapor (kg/s);

$\dot{m}_c$  = Vazão mássica de combustível (kg/s);

$h_v$  = Entalpia do vapor (kJ/kg);

PCI = Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg cb);

Os dados para obter o rendimento térmico foram obtidos através de relatórios da Usina em estudo (Tabela 9).

Tabela 9: Parâmetro para cálculo do rendimento térmico

Parâmetros	
$\dot{m}_v$	9,72 kg/s
$\dot{m}_c$	4,42 kg/s
$h_v$ (saturado: 233,9°C)	2804,2 kJ/kg
$h_v$ (supraaquecido:420°C)	3276,2 kJ/kg
$h_a$ (a 100°C)	104,89 kJ/kg

Portanto, de acordo com os dados dispostos na tabela, tem-se que:

<i>PCI ( a 50% de humidade)</i>	7528,18 kj/kg
-------------------------------------	---------------

$$\eta = 100. \frac{mv \cdot (hv - ha)}{mc \cdot pci}$$

*Eficiência antes do superaquecimento:*

$$\eta = 100. \frac{9,72 * (2804,20 - 104,89)}{4,42 \cdot 7528,18} = 0,7886 \sim 78,86\%$$

*Eficiência considerando os mecanismos de superaquecimento:*

$$\eta = 100. \frac{9,72 * (3276,2 - 167,53)}{4,42 \cdot 7528,18} = 0,908 \sim 91\%$$

### **Taxa de Evaporação e Rendimento Térmico**

A taxa de evaporação representa a quantidade de vapor gerado por unidade de massa de combustível queimado, e é dada pela equação (BAZZO, 1995):

$$TE = mv/mc$$

*TE* = Taxa de evaporação(kg/kg cb);

*mv* = Fluxo de vapor (kg/s);

*mc* = Consumo de combustível (kg/s);

$$TE = \frac{mv}{mc} = \frac{9,72}{4,42} \approx 2,2 \text{kgvap/kgcomb}$$

### **Consumo óptimo de combustível**

Representa a vazão de combustível ideal para obter um rendimento teórico de 100%. Na conversão da água em vapor dentro da fornalha.

Para calcular as energias trocadas entre o combustível e a água no interior da fornalha, considera-se o calor de saída, ou seja, a diferença de entalpia entre a água e o vapor, à mesma temperatura. O calor consumido pela água para a conversão em vapor é calculado por,

$$Q_s = \dot{m}v(hv - ha) = 9,72 * (2804,20 - 104,89) = 26,23Mj$$

Em que,

$\dot{m}v$  - Vazão do vapor em [kg/s]

$h_v$  - Entalpia do vapor [kJ/kg]

$h_a$  - Entalpia da água [kJ/kg]

Para encontrar o consumo óptimo do combustível, pode-se utilizar a seguinte equação,

$$Comb = \frac{Q_s}{PCI} = \frac{26237,3}{7528,18} = 3,49 \text{ ton/h}$$

### **Taxa de Evaporação e Rendimento Térmico considerando o consumo óptimo de combustível**

$$TE = \frac{\dot{m}v}{\dot{m}c_{op}} = \frac{9,72}{3,49} \approx 2,76 \text{ kgvap/kgcomb}$$

Considerando o consumo óptimo de combustível como o caudal de combustível temos um acréscimo na taxa de evaporação em 0,4 Ton/h

### **Avaliação das perdas de carga na linha de vapor**

Determinação das perdas de carga

*Trecho 1: caldeira até o ponto de separação*

O primeiro passo foi determinar a velocidade do vapor que atravessa esta secção da tubulação

$$Q = \rho * v * A$$
$$v = \frac{Q}{\rho * A} = \frac{29,17}{9,79 * 0,38} = 7,84m/s$$

O cálculo da perda de carga foi realizado na sequência:

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} = \frac{9,97 * 7,84 * 0,7}{1,6 * 10^{-5}} = 3,18 * 10^6$$

$$\left(\frac{k}{D}\right) = \frac{4,5 * 10^{-5}}{0,7} = 6,43 * 10^{-5}$$

Interpolando os valores de rugosidade ( $\epsilon$ ) e Reynolds no gráfico, temos o factor  $f=0,0118$

- Para a perda de carga na primeira secção na tubulação recta temos:

$$h_{fd1} = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g} = 0,118 * \frac{60}{0,7} * \frac{7,84^2}{2 * 9,81} = 3,36m$$

Onde:

L= Comprimento na I secção recta da tubulação

- Perda de carga na primeira secção nos acessórios:

$$h_{fl1} = \sum nk * \frac{v^2}{2 * \rho} = \frac{5,8 * 7,84^2}{2 * 9,97} = 8,145m$$

Onde:

$K$ = factor de perda de carga singular ( $2*90^\circ = 1,8$  ;  $2*45^\circ = 0,8$ ).

$n$ = Número de singularidades.

- Perda de carga total na primeira seção:

$$hf1 = hfd1 + hfl1$$

$$hf1 = 3,36 + 8,145 = 11,51m$$

Refazendo os cálculos para diferentes diametro temos :

Di (m)	At (m <sup>2</sup> )	v(m/s)	Re	f	hfd1(m)	hfl1(m)	hf1(m)
<b>0,4</b>	0,126	23,64	$5,5 * 10^6$	0,0126	53,83	74,05	128,32
<b>0,5</b>	0,012	15,20	$4,4 * 10^6$	0,0122	17,24	30,616	47,857
<b>0,6</b>	0,283	10,53	$3,6 * 10^6$	0,012	6,78	13,787	20,567
<b>0,7</b>	0,38	7,840	$3,2 * 10^6$	0,0118	3,36	8,145	11,505
<b>0,8</b>	0,50	5,958	$2,8 * 10^6$	0,0028	0,39	4,7	5,09

*Trecho II: ponto de separação até a central eléctrica*

Para os cálculos de perda de carga na 2 seção da tubulação, se fez necessário o cálculo da nova velocidade pois o diâmetro da tubulação é reduzido para 0,5m

$$Q = \rho * v * A$$

$$v = \frac{Q}{\rho * A} = \frac{19,17}{9,79 * 0,192} = 9,99m/s$$

O cálculo da perda de carga foi realizado na sequência:

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} = \frac{9,97 * 9,99 * 0,5}{1,6 * 10^{-5}} = 2,88 * 10^6$$

$$\left(\frac{k}{D}\right) = \frac{4.5 * 10^{-5}}{0.5} = 9^{-5}$$

Interpolando os valores de rugosidade ( $\epsilon$ ) e Reynolds no gráfico, temos o factor  $f=0,0125$

- Para a perda de carga na segunda seção na tubulação recta temos:

$$hfd2 = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g} = 0,125 * \frac{60}{0,5} * \frac{9,99^2}{2 * 9,81} = 7.86m$$

Onde:

L= Comprimento da seção recta da tubulação

- Perda de carga na primeira seção nos acessórios:

$$hfl2 = \sum nk * \frac{v^2}{2 * g} = \frac{4,93 * 9,97 * 9,99^2}{2} = 30,75m$$

Onde:

K= factor de perda de carga singular ( $2*90^\circ = 1,8$  ;  $2*45^\circ = 0,8$ ).

n= Número de singularidades.

- Perda de carga total na primeira seção:

$$hf2 = hfd2 + hfl2$$

$$hf2 = 7.86 + 30,75 = 38,61m$$

Refazendo os cálculos para diferentes diametro temos :

<b>Di (m)</b>	<b>At (m<sup>2</sup>)</b>	<b>v(m/s)</b>	<b>Re</b>	<b>f</b>	<b>hfd1(m)</b>	<b>hfl1(m)</b>	<b>hf1(m)</b>
<b>0,4</b>	0,126	15,54	$3.6 * 10^6$	0,0128	23,4	71,38	128,32
<b>0,5</b>	0,012	9,99	$3 * 10^6$	0,0124	7,86	30,75	47,857
<b>0,6</b>	0,283	6,919	$2,4 * 10^6$	0,0122	2,94	14,15	20,567
<b>0,7</b>	0,38	5,153	$2,1 * 10^6$	0,0121	1,38	7,84	11,505
<b>0,8</b>	0,50	3,92	$1,8 * 10^6$	0,012	0,708	4,54	5,09

### **Avaliação das perdas térmicas devido a falta de isolamento na linha de vapor**

Para efeito de cálculos, a tubulação foi dividida em 2 secções.

#### **I-Secção**

Dados de entrada <

<b>Di (m)</b>	<b>t (mm)</b>	<b>T<sub>v</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>amb</sub> (°C)</b>	<b>P (bar)</b>	<b>h (W/m<sup>2</sup>·k)</b>	<b>ε</b>	<b>δ (w/m<sup>2</sup>k<sup>4</sup>)</b>
<b>0.7</b>	20	420	25	30	10	0,8	$5,67 * 10^{-8}$

Determinação da area

$$A = \pi * (Di + 2 * t) = \pi * (0.7 + 2 * 0,02) = 2,32m^2/m$$

Perdas de calor por convecção

$$q_{conv} = h. A. (T_w - T_{amb})$$

assumindo  $T_w = T_v$  tem-se:

$$q_{conv} = 10 * 2,23 * (420 - 25) = 9164W/m$$

Perdas de calor por Radiação

$$q_{rad} = \varepsilon * \delta * A * (T_w^4 - T_{amb}^4)$$

$$T_w = 420 + 273 = 693\text{K}$$

$$T_{\text{amb}} = 25 + 273 = 298\text{K}$$

$$q_{\text{rad}} = 0.8 * 5,6710^{-8} * 2,23 * (603^4 - 298^4) = 18780\text{W/m}$$

Perda total por comprimento de tubulação

$$q_{\text{total}} = q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}} = 9164 + 18780 = 27944\text{W/m}$$

para  $L=60\text{m}$

$$Q_{\text{total}} = q_{\text{total}} * L = 1676640$$

### Determinação da espessura Crítica de isolamento

$$R_c = \frac{k_{\text{iso}}}{h}$$

Onde:  $R_c$ -raio crítico de isolamento e  $k$ -condutividade do isolante

Para lã de vidro temos  $k=0,04\text{ W/m}^2\text{K}$

Então

$$R_c = \frac{0,04}{10} = 0,004\text{m}$$

Espessura crítica de isolamento  $t_c = R_{\text{ext}} - R_c = 0,37 - 0,004 = 0,366\text{m}$

### Determinação da espessura ótima de isolamento

$$q = \frac{2\pi L(T_w - T_{\text{amb}})}{\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{k_{\text{iso}}} + \frac{1}{h * r_2}}$$

Onde  $r_2$  é o raio externo do isolamento

Assumindo  $q_{\text{inicial}} = 2794,4\text{W/m}$

Para reduzir a perda resolvemos a equação para  $r_2$  ótimo, fazendo interação tem-se:

$$q_{desejado} = \frac{2\pi L(T_w - T_{amb})}{\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{k_{iso}} + \frac{1}{h * r_2}}$$

Assumindo  $q_{desejado} = 10\%$  de  $q_{inicial}$  temos

$$2794,4 = \frac{2\pi(693 - 298)}{\frac{\ln \frac{r_2}{0,37}}{0,04} + \frac{1}{10 * r_2}}$$

$$\rightarrow 2794,4 = \frac{2482}{\frac{\ln \frac{r_2}{0,37}}{0,04} + \frac{1}{10 * r_2}}$$

$$\rightarrow 2794,4 \left( \frac{\ln \frac{r_2}{0,37}}{0,04} + \frac{1}{10r_2} \right) = 2482$$

$$\rightarrow \frac{\ln \frac{r_2}{0,37}}{0,04} + \frac{1}{10r_2} \approx 0,888$$

$$\rightarrow \ln \frac{r_2}{0,37} + \frac{0,004}{r_2} \cong 0,0352$$

Resolvendo numericamente temos  $r_2 \cong 0,77m$

Espessura óptima de isolamento:  $top = r_2 - r_1 = 0,77 - 0,37 = 0,4m$

Para lã de vidro a espessura óptima de isolamento é de 0,4m

**Redução nas perdas**

$$q_{iso} = \frac{2\pi(T_w - T_{amb})}{\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{k_{iso}} + \frac{1}{h * r_2}}$$

$$q = \frac{2\pi(693 - 298)}{\frac{\ln \frac{0,77}{0,37}}{0,4} + \frac{1}{10 * 0,77}} = 134,7W/m$$

$$\%redução = \frac{q_{sem iso} - q_{iso}}{q_{sem iso}}$$

$$\%redução = \frac{27944 - 134,7}{27944} * 100\% = 99,5\%$$

## II-Secção

Utilizando a lei de fourier para condução de calor atraves da parede e a lei de newton para convecção de calor do exterior da tubulação para o ar ambiente temos:

Dados de entrada

<b>Di (m)</b>	<b>L(m)</b>	<b>t (mm)</b>	<b>Tv (°C)</b>	<b>T<sub>amb</sub> (°C)</b>	<b>P (bar)</b>	<b>h (W/m<sup>2</sup>·k)</b>	<b>k(W/m·k)</b>
0.5	1	20	420	25	30	10	50

**Determinação das resistencias térmicas**

$$R_{cond} = \frac{\ln \frac{r_{int}}{r_{ext}}}{2\pi kL} = \frac{\ln \frac{0,25}{0,27}}{2 * \pi * 50 * 1} = 2,45 * 10^{-4} K/W$$

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{ext} * 2\pi * r_{ext} * L} = \frac{1}{10 * 2\pi * 0,27 * 1} = 5,9 * 10^{-2} K/W$$

$$R_t = R_{cond} + R_{conv} = 2,45 * 10^{-4} + 5,9 * 10^{-2}$$

$$R_t = 5,92 * 10^{-2} K/W$$

**Taxa de transferência de calor (perdas)**

$$q = \frac{T_{vapor} - T_{amb}}{R_t} = \frac{420 - 25}{5,92 * 10^{-2}} = 6669,8 W/m$$

Para L=60m tem-se q=400140W

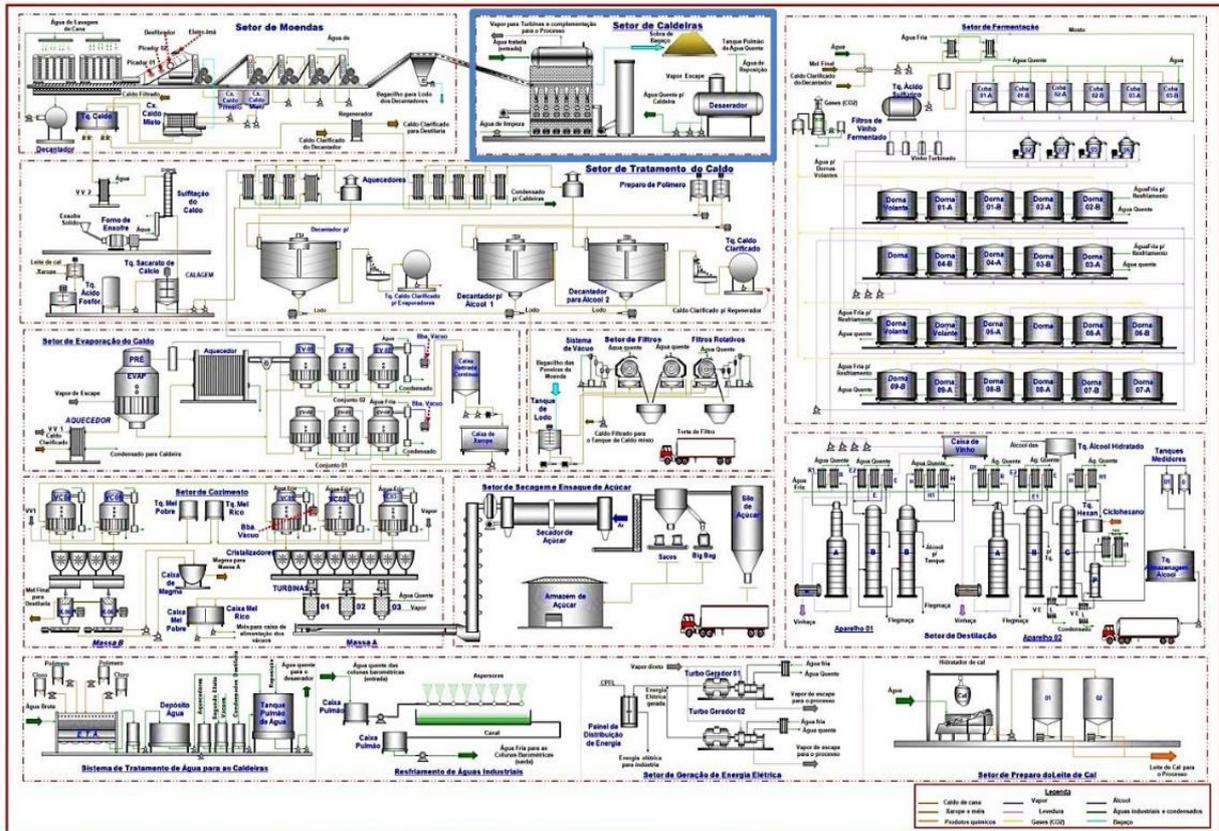
ANEXO A – Comprimentos equivalentes em conexões

Tabela de comprimentos equivalentes em metros de canalização, para cálculo das perdas de carga localizadas.										
CONEXÃO	Diâmetro nominal X Equivalência em metros de canalização									
	Material	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	5"
Curva 90°	PVC	0,5	0,6	0,7	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,9
	Metal	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,3	1,6	2,1
Curva 45°	PVC	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
	Metal	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9
Joelho 90°	PVC	1,2	1,5	2,0	3,2	3,4	3,7	3,9	4,3	4,9
	Metal	0,7	0,8	1,1	1,3	1,7	2,0	2,5	3,4	4,2
Joelho 45°	PVC	0,5	0,7	1,0	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	2,5
	Metal	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,2	1,5	1,9
Tê de passagem direta	PVC	0,8	0,9	1,5	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	3,3
	Metal	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,6	2,1	2,7
Tê de saída lateral	PVC	2,4	3,1	4,6	7,3	7,6	7,8	8,0	8,3	10,0
	Metal	1,4	1,7	2,3	2,8	3,5	4,3	5,2	6,7	8,4
Tê de saída bilateral	PVC	2,4	3,1	4,6	7,3	7,6	7,8	8,0	8,3	10,0
	Metal	1,4	1,7	2,3	2,8	3,5	4,3	5,2	6,7	8,4
União	PVC	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15	0,2	0,25
	Metal	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04
Saída de canalização	PVC	0,9	1,3	1,4	3,2	3,3	3,5	3,7	3,9	4,9
	Metal	0,5	0,7	0,9	1,0	1,5	1,9	2,2	3,2	4,0
Luva de redução (")	PVC	0,3	0,2	0,15	0,4	0,7	0,8	0,85	0,95	1,2
	Aço	0,29	0,16	0,12	0,38	0,64	0,71	0,78	0,9	1,07
Registro de gaveta ou esfera aberto	PVC	0,2	0,3	0,4	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1
	Metal	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,7	0,9
Registro de globo aberto	Metal	6,7	8,2	11,3	13,4	17,4	21,0	26,0	34,0	43,0
Registro de ângulo aberto	Metal	3,6	4,6	5,6	6,7	8,5	10,0	13,0	17,0	21,0
Válvula de pé com crivo	PVC	9,5	13,3	15,3	18,3	23,7	25,0	26,8	28,8	37,4
	Metal	5,6	7,3	10,0	11,6	14,0	17,0	22,0	23,0	30,0
Válvula de Retenção	Horizontal	Metal	1,6	2,1	2,7	3,2	4,2	5,2	6,3	10,4
	Vertical	Metal	2,4	3,2	4,0	4,8	6,4	8,1	9,7	16,1

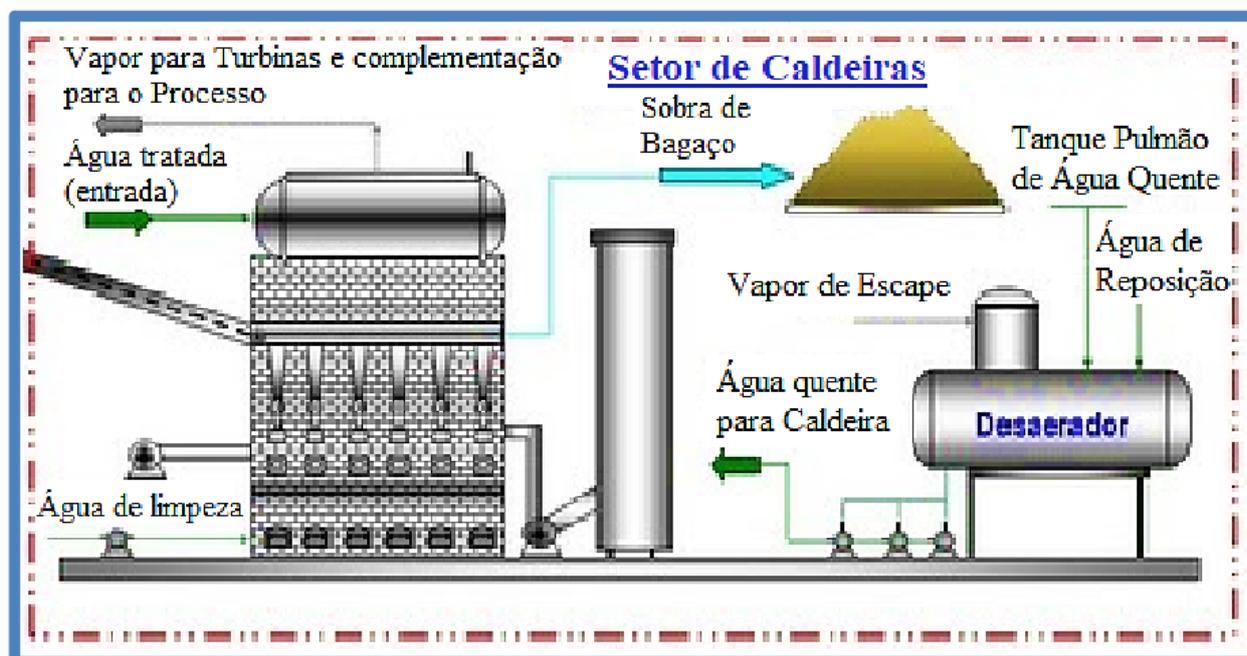
ANEXO B: Características nominais da caldeira N.2

<b>BOILER 2</b>			
BOILER MAKE	BABCOCK & WILCOX		
BOILER TYPE	2 - PASS BI-DRUM		
YEAR OF MANUFACTURE	1974		
COUNTRY OF MANUFACTURE	REPUBLIC OF SOUTH AFRICA		
NAME OF CUSTOMER	ACUCAREIRA DE MOCAMBIQUE, BEIRA		
FUEL	BAGASSE COAL		
BOILER EVAPORATION RATE	Units kg/hr	36,000	33,000
<b>PRESSURE RATINGS</b>			
DESIGN PRESSURE	bar	33.2	33.2
WORKING PRESSURE	bar	31.3	31.3
DRUM PRESSURE	bar	31.3	31.3
SUPERHEATER OUTLET PRESSURE	bar	29.9	29.9
<b>TEMPERATURE RATINGS</b>			
STEAM SUPERHEATER OUTLET	C	385	354
WATER ECONOMISER OUTLET	C	100	100
WATER ECONOMISER OUTLET	C	120	114
AS AIRHEATER OUTLET	C	257	216
S ECONOMISER OUTLET	C	215	181
BIENT TEMPERATURE	C	32	32

# ANEXO C: Fluxograma de processo de uma usina sucroenergética



ANEXO D: Recorte do sector das caldeiras do fluxograma de processo de uma usina.



ANEXO E: Tabela de propriedades da água saturada

**TABELA A-3**

Propriedades da água saturada

Temp. T, °C	Pressão de Saturação P <sub>sat</sub> , kPa	Densidade ρ, kg/m <sup>3</sup>		Entalpia de Vaporização h <sub>fg</sub> , kJ/kg	Calor Específico c <sub>p</sub> , J/kg · K		Condutividade Térmica k, W/m · K		Viscosidade Dinâmica μ, kg/m · s		Número de Prandtl Pr		Coeficiente de Expansão Volumétrica β, 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0,01	0,6113	999,8	0,0048	2501	4217	1854	0,561	0,0171	1,792 × 10 <sup>-3</sup>	0,922 × 10 <sup>-5</sup>	13,5	1,00	-0,068 × 10 <sup>-3</sup>
5	0,8721	999,9	0,0068	2490	4205	1857	0,571	0,0173	1,519 × 10 <sup>-3</sup>	0,934 × 10 <sup>-5</sup>	11,2	1,00	0,015 × 10 <sup>-3</sup>
10	1,2276	999,7	0,0094	2478	4194	1862	0,580	0,0176	1,307 × 10 <sup>-3</sup>	0,946 × 10 <sup>-5</sup>	9,45	1,00	0,733 × 10 <sup>-3</sup>
15	1,7051	999,1	0,0128	2466	4186	1863	0,589	0,0179	1,138 × 10 <sup>-3</sup>	0,959 × 10 <sup>-5</sup>	8,09	1,00	0,138 × 10 <sup>-3</sup>
20	2,339	998,0	0,0173	2454	4182	1867	0,598	0,0182	1,002 × 10 <sup>-3</sup>	0,973 × 10 <sup>-5</sup>	7,01	1,00	0,195 × 10 <sup>-3</sup>
25	3,169	997,0	0,0231	2442	4180	1870	0,607	0,0186	0,891 × 10 <sup>-3</sup>	0,987 × 10 <sup>-5</sup>	6,14	1,00	0,247 × 10 <sup>-3</sup>
30	4,246	996,0	0,0304	2431	4178	1875	0,615	0,0189	0,798 × 10 <sup>-3</sup>	1,001 × 10 <sup>-5</sup>	5,42	1,00	0,294 × 10 <sup>-3</sup>
35	5,628	994,0	0,0397	2419	4178	1880	0,623	0,0192	0,720 × 10 <sup>-3</sup>	1,016 × 10 <sup>-5</sup>	4,83	1,00	0,337 × 10 <sup>-3</sup>
40	7,384	992,1	0,0512	2407	4179	1885	0,631	0,0196	0,653 × 10 <sup>-3</sup>	1,031 × 10 <sup>-5</sup>	4,32	1,00	0,377 × 10 <sup>-3</sup>
45	9,593	990,1	0,0655	2395	4180	1892	0,637	0,0200	0,596 × 10 <sup>-3</sup>	1,046 × 10 <sup>-5</sup>	3,91	1,00	0,415 × 10 <sup>-3</sup>
50	12,35	988,1	0,0831	2383	4181	1900	0,644	0,0204	0,547 × 10 <sup>-3</sup>	1,062 × 10 <sup>-5</sup>	3,55	1,00	0,451 × 10 <sup>-3</sup>
55	15,76	985,0	0,1045	2371	4183	1908	0,649	0,0208	0,504 × 10 <sup>-3</sup>	1,077 × 10 <sup>-5</sup>	3,25	1,00	0,484 × 10 <sup>-3</sup>
60	19,94	983,3	0,1304	2359	4185	1916	0,654	0,0212	0,467 × 10 <sup>-3</sup>	1,093 × 10 <sup>-5</sup>	2,99	1,00	0,517 × 10 <sup>-3</sup>
65	25,03	980,4	0,1614	2346	4187	1926	0,659	0,0216	0,433 × 10 <sup>-3</sup>	1,110 × 10 <sup>-5</sup>	2,75	1,00	0,548 × 10 <sup>-3</sup>
70	31,19	977,5	0,1983	2334	4190	1936	0,663	0,0221	0,404 × 10 <sup>-3</sup>	1,126 × 10 <sup>-5</sup>	2,55	1,00	0,578 × 10 <sup>-3</sup>
75	38,58	974,7	0,2421	2321	4193	1948	0,667	0,0225	0,378 × 10 <sup>-3</sup>	1,142 × 10 <sup>-5</sup>	2,38	1,00	0,607 × 10 <sup>-3</sup>
80	47,39	971,8	0,2935	2309	4197	1962	0,670	0,0230	0,355 × 10 <sup>-3</sup>	1,159 × 10 <sup>-5</sup>	2,22	1,00	0,633 × 10 <sup>-3</sup>
85	57,83	968,1	0,3536	2296	4201	1977	0,673	0,0235	0,333 × 10 <sup>-3</sup>	1,176 × 10 <sup>-5</sup>	2,08	1,00	0,670 × 10 <sup>-3</sup>
90	70,14	965,0	0,4235	2283	4206	1993	0,675	0,0240	0,315 × 10 <sup>-3</sup>	1,193 × 10 <sup>-5</sup>	1,96	1,00	0,702 × 10 <sup>-3</sup>
95	84,55	961,5	0,5045	2270	4212	2010	0,677	0,0246	0,297 × 10 <sup>-3</sup>	1,210 × 10 <sup>-5</sup>	1,85	1,00	0,716 × 10 <sup>-3</sup>
100	101,33	957,9	0,5978	2257	4217	2029	0,679	0,0251	0,282 × 10 <sup>-3</sup>	1,227 × 10 <sup>-5</sup>	1,75	1,00	0,750 × 10 <sup>-3</sup>
110	143,27	950,6	0,8263	2230	4229	2071	0,682	0,0262	0,255 × 10 <sup>-3</sup>	1,261 × 10 <sup>-5</sup>	1,58	1,00	0,798 × 10 <sup>-3</sup>
120	198,53	943,4	1,121	2203	4244	2120	0,683	0,0275	0,232 × 10 <sup>-3</sup>	1,296 × 10 <sup>-5</sup>	1,44	1,00	0,858 × 10 <sup>-3</sup>
130	270,1	934,6	1,496	2174	4263	2177	0,684	0,0288	0,213 × 10 <sup>-3</sup>	1,330 × 10 <sup>-5</sup>	1,33	1,01	0,913 × 10 <sup>-3</sup>
140	361,3	921,7	1,965	2145	4286	2244	0,683	0,0301	0,197 × 10 <sup>-3</sup>	1,365 × 10 <sup>-5</sup>	1,24	1,02	0,970 × 10 <sup>-3</sup>
150	475,8	916,6	2,546	2114	4311	2314	0,682	0,0316	0,183 × 10 <sup>-3</sup>	1,399 × 10 <sup>-5</sup>	1,16	1,02	1,025 × 10 <sup>-3</sup>
160	617,8	907,4	3,256	2083	4340	2420	0,680	0,0331	0,170 × 10 <sup>-3</sup>	1,434 × 10 <sup>-5</sup>	1,09	1,05	1,145 × 10 <sup>-3</sup>
170	791,7	897,7	4,119	2050	4370	2490	0,677	0,0347	0,160 × 10 <sup>-3</sup>	1,468 × 10 <sup>-5</sup>	1,03	1,05	1,178 × 10 <sup>-3</sup>
180	1002,1	887,3	5,153	2015	4410	2590	0,673	0,0364	0,150 × 10 <sup>-3</sup>	1,502 × 10 <sup>-5</sup>	0,983	1,07	1,210 × 10 <sup>-3</sup>
190	1254,4	876,4	6,388	1979	4460	2710	0,669	0,0382	0,142 × 10 <sup>-3</sup>	1,537 × 10 <sup>-5</sup>	0,947	1,09	1,280 × 10 <sup>-3</sup>
200	1553,8	864,3	7,852	1941	4500	2840	0,663	0,0401	0,134 × 10 <sup>-3</sup>	1,571 × 10 <sup>-5</sup>	0,910	1,11	1,350 × 10 <sup>-3</sup>
220	2318	840,3	11,60	1859	4610	3110	0,650	0,0442	0,122 × 10 <sup>-3</sup>	1,641 × 10 <sup>-5</sup>	0,865	1,15	1,520 × 10 <sup>-3</sup>
240	3344	813,7	16,73	1767	4760	3520	0,632	0,0487	0,111 × 10 <sup>-3</sup>	1,712 × 10 <sup>-5</sup>	0,836	1,24	1,720 × 10 <sup>-3</sup>
260	4688	783,7	23,69	1663	4970	4070	0,609	0,0540	0,102 × 10 <sup>-3</sup>	1,788 × 10 <sup>-5</sup>	0,832	1,35	2,000 × 10 <sup>-3</sup>
280	6412	750,8	33,15	1544	5280	4835	0,581	0,0605	0,094 × 10 <sup>-3</sup>	1,870 × 10 <sup>-5</sup>	0,854	1,49	2,380 × 10 <sup>-3</sup>
300	8581	713,8	46,15	1405	5750	5980	0,548	0,0695	0,086 × 10 <sup>-3</sup>	1,965 × 10 <sup>-5</sup>	0,902	1,69	2,950 × 10 <sup>-3</sup>
320	11,274	667,1	64,57	1239	6540	7900	0,509	0,0836	0,078 × 10 <sup>-3</sup>	2,084 × 10 <sup>-5</sup>	1,00	1,97	
340	14,586	610,5	92,62	1028	8240	11,870	0,469	0,110	0,070 × 10 <sup>-3</sup>	2,255 × 10 <sup>-5</sup>	1,23	2,43	
360	18,651	528,3	144,0	720	14,690	25,800	0,427	0,178	0,060 × 10 <sup>-3</sup>	2,571 × 10 <sup>-5</sup>	2,06	3,73	
374,14	22,090	317,0	317,0	0	—	—	—	—	0,043 × 10 <sup>-3</sup>	4,313 × 10 <sup>-5</sup>			

Nota 1: A viscosidade cinemática ν e a difusividade térmica α podem ser calculadas de suas definições, ν = μ/ρ e α = k/ρc<sub>p</sub> = νPr. As temperaturas 0,01°C, 100°C, e 374,14°C são as temperaturas tripla, de ebulição e de ponto crítico da água respectivamente. As propriedades listadas acima (exceto pela densidade do vapor) podem ser usadas a qualquer pressão com erro desprezível, exceto a temperaturas próximas do valor do ponto crítico.

Nota 2: A unidade kJ/kg · °C do calor específico é equivalente a kJ/kg · K, e a unidade W/m · °C da condutividade térmica é equivalente a W/m · K.

Fonte: Os dados de viscosidade e condutividade térmica são de J. V. Sengers e J. T. R. Watson, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 15 (1986), pp. 1291-1322. Os outros dados foram obtidos de diversas fontes ou foram calculados.

## ANEXO F: Tabela de propriedades do líquido-vapor saturado

**TABELA A-4**

Água, líquido-vapor saturados – Tabela com entrada de temperatura

Temp., $T$ °C	Press. sat., $P_{sat}$ kPa	Volume específico, $m^3/kg$		Energia interna, kJ/kg			Entalpia, kJ/kg			Entropia, kJ/kg-K		
		Líqu. sat., $v_f$	Vapor sat., $v_g$	Líqu. sat., $u_f$	Evap., $u_{fg}$	Vapor sat., $u_g$	Líqu. sat. $h_f$	Evap., $h_{fg}$	Vapor sat. $h_g$	Líqu. sat. $s_f$	Evap., $s_{fg}$	Vapor sat. $s_g$
0,01	0,6117	0,001000	206,00	0,000	2.374,9	2.374,9	0,001	2.500,9	2.500,9	0,0000	9,1556	9,1556
5	0,8725	0,001000	147,03	21,019	2.360,8	2.381,8	21,020	2.489,1	2.510,1	0,0763	8,9487	9,0249
10	1,2281	0,001000	106,32	42,020	2.346,6	2.388,7	42,022	2.477,2	2.519,2	0,1511	8,7488	8,8999
15	1,7057	0,001001	77,885	62,980	2.332,5	2.395,5	62,982	2.465,4	2.528,3	0,2245	8,5559	8,7803
20	2,3392	0,001002	57,762	83,913	2.318,4	2.402,3	83,915	2.453,5	2.537,4	0,2965	8,3696	8,6661
25	3,1698	0,001003	43,340	104,83	2.304,3	2.409,1	104,83	2.441,7	2.546,5	0,3672	8,1895	8,5567
30	4,2469	0,001004	32,879	125,73	2.290,2	2.415,9	125,74	2.429,8	2.555,6	0,4368	8,0152	8,4520
35	5,6291	0,001006	25,205	146,63	2.276,0	2.422,7	146,64	2.417,9	2.564,6	0,5051	7,8466	8,3517
40	7,3851	0,001008	19,515	167,53	2.261,9	2.429,4	167,53	2.406,0	2.573,5	0,5724	7,6832	8,2556
45	9,5953	0,001010	15,251	188,43	2.247,7	2.436,1	188,44	2.394,0	2.582,4	0,6386	7,5247	8,1633
50	12,352	0,001012	12,026	209,33	2.233,4	2.442,7	209,34	2.382,0	2.591,3	0,7038	7,3710	8,0748
55	15,763	0,001015	9,5639	230,24	2.219,1	2.449,3	230,26	2.369,8	2.600,1	0,7680	7,2218	7,9898
60	19,947	0,001017	7,6670	251,16	2.204,7	2.455,9	251,18	2.357,7	2.608,8	0,8313	7,0769	7,9082
65	25,043	0,001020	6,1935	272,09	2.190,3	2.462,4	272,12	2.345,4	2.617,5	0,8937	6,9360	7,8296
70	31,202	0,001023	5,0396	293,04	2.175,8	2.468,9	293,07	2.333,0	2.626,1	0,9551	6,7989	7,7540
75	38,597	0,001026	4,1291	313,99	2.161,3	2.475,3	314,03	2.320,6	2.634,6	1,0158	6,6655	7,6812
80	47,416	0,001029	3,4053	334,97	2.146,6	2.481,6	335,02	2.308,0	2.643,0	1,0756	6,5355	7,6111
85	57,868	0,001032	2,8261	355,96	2.131,9	2.487,8	356,02	2.295,3	2.651,4	1,1346	6,4089	7,5435
90	70,183	0,001036	2,3593	376,97	2.117,0	2.494,0	377,04	2.282,5	2.659,6	1,1929	6,2853	7,4782
95	84,609	0,001040	1,9808	398,00	2.102,0	2.500,1	398,09	2.269,6	2.667,6	1,2504	6,1647	7,4151
100	101,42	0,001043	1,6720	419,06	2.087,0	2.506,0	419,17	2.256,4	2.675,6	1,3072	6,0470	7,3542
105	120,90	0,001047	1,4186	440,15	2.071,8	2.511,9	440,28	2.243,1	2.683,4	1,3634	5,9319	7,2952
110	143,38	0,001052	1,2094	461,27	2.056,4	2.517,7	461,42	2.229,7	2.691,1	1,4188	5,8193	7,2382
115	169,18	0,001056	1,0360	482,42	2.040,9	2.523,3	482,59	2.216,0	2.698,6	1,4737	5,7092	7,1829
120	198,67	0,001060	0,89133	503,60	2.025,3	2.528,9	503,81	2.202,1	2.706,0	1,5279	5,6013	7,1292
125	232,23	0,001065	0,77012	524,83	2.009,5	2.534,3	525,07	2.188,1	2.713,1	1,5816	5,4956	7,0771
130	270,28	0,001070	0,66808	546,10	1.993,4	2.539,5	546,38	2.173,7	2.720,1	1,6346	5,3919	7,0265
135	313,22	0,001075	0,58179	567,41	1.977,3	2.544,7	567,75	2.159,1	2.726,9	1,6872	5,2901	6,9773
140	361,53	0,001080	0,50850	588,77	1.960,9	2.549,6	589,16	2.144,3	2.733,5	1,7392	5,1901	6,9294
145	415,68	0,001085	0,44600	610,19	1.944,2	2.554,4	610,64	2.129,2	2.739,8	1,7908	5,0919	6,8827
150	476,16	0,001091	0,39248	631,66	1.927,4	2.559,1	632,18	2.113,8	2.745,9	1,8418	4,9953	6,8371
155	543,49	0,001096	0,34648	653,19	1.910,3	2.563,5	653,79	2.098,0	2.751,8	1,8924	4,9002	6,7927
160	618,23	0,001102	0,30680	674,79	1.893,0	2.567,8	675,47	2.082,0	2.757,5	1,9426	4,8066	6,7492
165	700,93	0,001108	0,27244	696,46	1.875,4	2.571,9	697,24	2.065,6	2.762,8	1,9923	4,7143	6,7067
170	792,18	0,001114	0,24260	718,20	1.857,5	2.575,7	719,08	2.048,8	2.767,9	2,0417	4,6233	6,6650
175	892,60	0,001121	0,21659	740,02	1.839,4	2.579,4	741,02	2.031,7	2.772,7	2,0906	4,5335	6,6242
180	1.002,8	0,001127	0,19384	761,92	1.820,9	2.582,8	763,05	2.014,2	2.777,2	2,1392	4,4448	6,5841
185	1.123,5	0,001134	0,17390	783,91	1.802,1	2.586,0	785,19	1.996,2	2.781,4	2,1875	4,3572	6,5447
190	1.255,2	0,001141	0,15636	806,00	1.783,0	2.589,0	807,43	1.977,9	2.785,3	2,2355	4,2705	6,5059
195	1.398,8	0,001149	0,14089	828,18	1.763,6	2.591,7	829,78	1.959,0	2.788,8	2,2831	4,1847	6,4678
200	1.554,9	0,001157	0,12721	850,46	1.743,7	2.594,2	852,26	1.939,8	2.792,0	2,3305	4,0997	6,4302

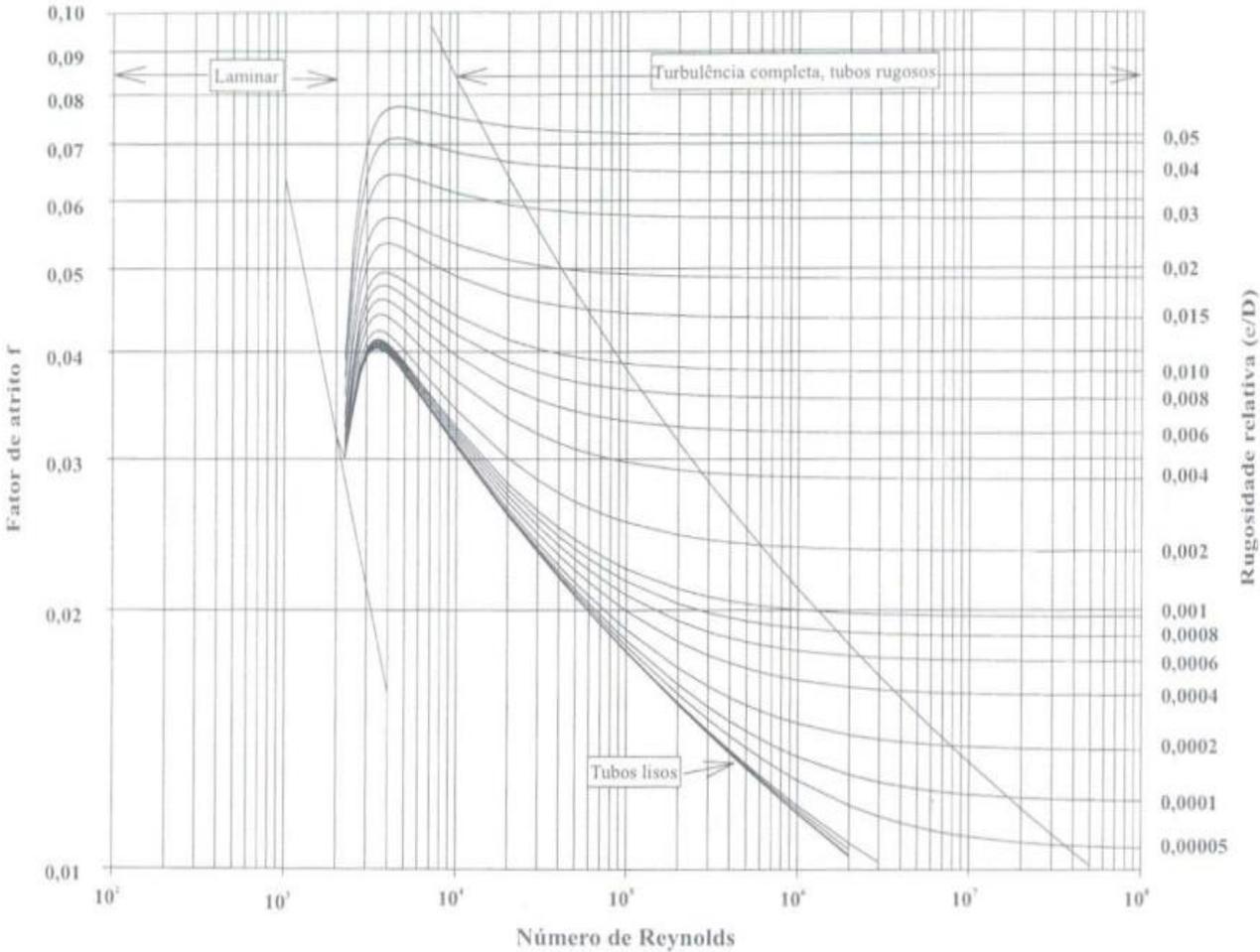
ANEXO G: Tabela de propriedades do vapor superaquecido

**TABELA A-6**

Água, vapor superaquecido (*conclusão*)

<i>T</i> °C	<i>v</i> m³/kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg-K	<i>v</i> m³/kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg-K	<i>v</i> m³/kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg-K
<b><i>P</i> = 1,00 MPa (179,88 °C)</b>				<b><i>P</i> = 1,20 MPa (187,96 °C)</b>				<b><i>P</i> = 1,40 MPa (195,04 °C)</b>				
Sat.	0,19437	2.582,8	2.777,1	6,5850	0,16326	2.587,8	2.783,8	6,5217	0,14078	2.591,8	2.788,9	6,4675
200	0,20602	2.622,3	2.828,3	6,6956	0,16934	2.612,9	2.816,1	6,5909	0,14303	2.602,7	2.803,0	6,4975
250	0,23275	2.710,4	2.943,1	6,9265	0,19241	2.704,7	2.935,6	6,8313	0,16356	2.698,9	2.927,9	6,7488
300	0,25799	2.793,7	3.051,6	7,1246	0,21386	2.789,7	3.046,3	7,0335	0,18233	2.785,7	3.040,9	6,9553
350	0,28250	2.875,7	3.158,2	7,3029	0,23455	2.872,7	3.154,2	7,2139	0,20029	2.869,7	3.150,1	7,1379
400	0,30661	2.957,9	3.264,5	7,4670	0,25482	2.955,5	3.261,3	7,3793	0,21782	2.953,1	3.258,1	7,3046
500	0,35411	3.125,0	3.479,1	7,7642	0,29464	3.123,4	3.477,0	7,6779	0,25216	3.121,8	3.474,8	7,6047
600	0,40111	3.297,5	3.698,6	8,0311	0,33395	3.296,3	3.697,0	7,9456	0,28597	3.295,1	3.695,5	7,8730
700	0,44783	3.476,3	3.924,1	8,2755	0,37297	3.475,3	3.922,9	8,1904	0,31951	3.474,4	3.921,7	8,1183
800	0,49438	3.661,7	4.156,1	8,5024	0,41184	3.661,0	4.155,2	8,4176	0,35288	3.660,3	4.154,3	8,3458
900	0,54083	3.853,9	4.394,8	8,7150	0,45059	3.853,3	4.394,0	8,6303	0,38614	3.852,7	4.393,3	8,5587
1.000	0,58721	4.052,7	4.640,0	8,9155	0,48928	4.052,2	4.639,4	8,8310	0,41933	4.051,7	4.638,8	8,7595
1.100	0,63354	4.257,9	4.891,4	9,1057	0,52792	4.257,5	4.891,0	9,0212	0,45247	4.257,0	4.890,5	8,9497
1.200	0,67983	4.469,0	5.148,9	9,2866	0,56652	4.468,7	5.148,5	9,2022	0,48558	4.468,3	5.148,1	9,1308
1.300	0,72610	4.685,8	5.411,9	9,4593	0,60509	4.685,5	5.411,6	9,3750	0,51866	4.685,1	5.411,3	9,3036
<b><i>P</i> = 1,60 MPa (201,37 °C)</b>				<b><i>P</i> = 1,80 MPa (207,11 °C)</b>				<b><i>P</i> = 2,00 MPa (212,38 °C)</b>				
Sat.	0,12374	2.594,8	2.792,8	6,4200	0,11037	2.597,3	2.795,9	6,3775	0,09959	2.599,1	2.798,3	6,3390
225	0,13293	2.645,1	2.857,8	6,5537	0,11678	2.637,0	2.847,2	6,4825	0,10381	2.628,5	2.836,1	6,4160
250	0,14190	2.692,9	2.919,9	6,6753	0,12502	2.686,7	2.911,7	6,6088	0,11150	2.680,3	2.903,3	6,5475
300	0,15866	2.781,6	3.035,4	6,8864	0,14025	2.777,4	3.029,9	6,8246	0,12551	2.773,2	3.024,2	6,7684
350	0,17459	2.866,6	3.146,0	7,0713	0,15460	2.863,6	3.141,9	7,0120	0,13860	2.860,5	3.137,7	6,9583
400	0,19007	2.950,8	3.254,9	7,2394	0,16849	2.948,3	3.251,6	7,1814	0,15122	2.945,9	3.248,4	7,1292
500	0,22029	3.120,1	3.472,6	7,5410	0,19551	3.118,5	3.470,4	7,4845	0,17568	3.116,9	3.468,3	7,4337
600	0,24999	3.293,9	3.693,9	7,8101	0,22200	3.292,7	3.692,3	7,7543	0,19962	3.291,5	3.690,7	7,7043
700	0,27941	3.473,5	3.920,5	8,0558	0,24822	3.472,6	3.919,4	8,0005	0,22326	3.471,7	3.918,2	7,9509
800	0,30865	3.659,5	4.153,4	8,2834	0,27426	3.658,8	4.152,4	8,2284	0,24674	3.658,0	4.151,5	8,1791
900	0,33780	3.852,1	4.392,6	8,4965	0,30020	3.851,5	4.391,9	8,4417	0,27012	3.850,9	4.391,1	8,3925
1.000	0,36687	4.051,2	4.638,2	8,6974	0,32606	4.050,7	4.637,6	8,6427	0,29342	4.050,2	4.637,1	8,5936
1.100	0,39589	4.256,6	4.890,0	8,8878	0,35188	4.256,2	4.889,6	8,8331	0,31667	4.255,7	4.889,1	8,7842
1.200	0,42488	4.467,9	5.147,7	9,0689	0,37766	4.467,6	5.147,3	9,0143	0,33989	4.467,2	5.147,0	8,9654
1.300	0,45383	4.684,8	5.410,9	9,2418	0,40341	4.684,5	5.410,6	9,1872	0,36308	4.684,2	5.410,3	9,1384
<b><i>P</i> = 2,50 MPa (223,95 °C)</b>				<b><i>P</i> = 3,00 MPa (233,85 °C)</b>				<b><i>P</i> = 3,50 MPa (242,56 °C)</b>				
Sat.	0,07995	2.602,1	2.801,9	6,2558	0,06667	2.603,2	2.803,2	6,1856	0,05706	2.603,0	2.802,7	6,1244
225	0,08026	2.604,8	2.805,5	6,2629								
250	0,08705	2.663,3	2.880,9	6,4107	0,07063	2.644,7	2.856,5	6,2893	0,05876	2.624,0	2.829,7	6,1764
300	0,09894	2.762,2	3.009,6	6,6459	0,08118	2.750,8	2.994,3	6,5412	0,06845	2.738,8	2.978,4	6,4484
350	0,10979	2.852,5	3.127,0	6,8424	0,09056	2.844,4	3.116,1	6,7450	0,07680	2.836,0	3.104,9	6,6601
400	0,12012	2.939,8	3.240,1	7,0170	0,09938	2.933,6	3.231,7	6,9235	0,08456	2.927,2	3.223,2	6,8428
450	0,13015	3.026,2	3.351,6	7,1768	0,10789	3.021,2	3.344,9	7,0856	0,09198	3.016,1	3.338,1	7,0074
500	0,13999	3.112,8	3.462,8	7,3254	0,11620	3.108,6	3.457,2	7,2359	0,09919	3.104,5	3.451,7	7,1593
600	0,15931	3.288,5	3.686,8	7,5979	0,13245	3.285,5	3.682,8	7,5103	0,11325	3.282,5	3.678,9	7,4357
700	0,17835	3.469,3	3.915,2	7,8455	0,14841	3.467,0	3.912,2	7,7590	0,12702	3.464,7	3.909,3	7,6855
800	0,19722	3.656,2	4.149,2	8,0744	0,16420	3.654,3	4.146,9	7,9885	0,14061	3.652,5	4.144,6	7,9156
900	0,21597	3.849,4	4.389,3	8,2882	0,17988	3.847,9	4.387,5	8,2028	0,15410	3.846,4	4.385,7	8,1304
1.000	0,23466	4.049,0	4.635,6	8,4897	0,19549	4.047,7	4.634,2	8,4045	0,16751	4.046,4	4.632,7	8,3324
1.100	0,25330	4.254,7	4.887,9	8,6804	0,21105	4.253,6	4.886,7	8,5955	0,18087	4.252,5	4.885,6	8,5236
1.200	0,27190	4.466,3	5.146,0	8,8618	0,22658	4.465,3	5.145,1	8,7771	0,19420	4.464,4	5.144,1	8,7053
1.300	0,29048	4.683,4	5.409,5	9,0349	0,24207	4.682,6	5.408,8	8,9502	0,20750	4.681,8	5.408,0	8,8786

ANEXO H: Factor de fricção de darcy



ANEXO I: Valores da rugosidade absoluta equivalente

MATERIAL	$\epsilon$ (mm) Rugosidade Absoluta Equivalente
Aço comercial novo	0,045
Aço laminado novo	0,04 a 0,10
Aço soldado novo	0,05 a 0,10
Aço soldado limpo, usado	0,15 a 0,20
Aço soldado moderadamente oxidado	0,4
Aço soldado revestido de cimento centrifugado	0,10
Aço laminado revestido de asfalto	0,05
Aço rebitado novo	1 a 3
Aço rebitado em uso	6
Aço galvanizado, com costura	0,15 a 0,20
Aço galvanizado, sem costura	0,06 a 0,15
Ferro forjado	0,05
Ferro fundido novo	0,25 a 0,50
Ferro fundido com leve oxidação	0,30
Ferro fundido velho	3 a 5
Ferro fundido centrifugado	0,05
Ferro fundido em uso com cimento centrifugado	0,10
Ferro fundido com revestimento asfáltico	0,12 a 0,20
Ferro fundido oxidado	1 a 1,5
Cimento amianto novo	0,025
Concreto centrifugado novo	0,16
Concreto armado liso, vários anos de uso	0,20 a 0,30
Concreto com acabamento normal	1 a 3
Concreto protendido Freyssinet	0,04
Cobre, latão, aço revestido de epóxi, PVC, plásticos em geral, tubos extrudados	0,0015 a 0,010



Centro de Formação Profissional de Mafambisse

### Declaração

Tongaathulett - Açucareira de Moçambique S.A. com Plantação de Cana Sacarina e Fábrica de Açúcar em Mafambisse, Distrito de Dondo, Província de Sofala, declara que o estudante **António Miguel Tomás** estagiou nesta Empresa no Departamento Fabril, Sector de Processo, onde exerceu actividades tais como:

- 1- Determinação do Brix, Pol e Pureza do sumo claro, do xarope e do melaço.
- 2- Controle da temperatura nos aquecedores e PH dos sumos
- 3- Operação e controle das turbinas a vapor e da planta.
- 4- Controle da temperatura e pressão no interior dos evaporadores.
- 5- Controle da temperatura na panela A1 e A3, controlo do fluxo de vapor na A2.
- 6- Adição do floculantes, tratamento químico da água e verificação do nível da água nas centrifugas.
- 7- Determinação da demanda química de oxigénio na água das caldeiras.
- 8- Determinação da dureza da água tratada e da água das caldeiras.
- 9- Inspeção e manutenção das bombas de cal e dos filtros de lama.
- 10- Controle de qualidade do açúcar.

É salientar que o estágio foi no periodo entre 28 de Agosto de 2023 até 24 de Novembro de 2023, tendo tido bom aproveitamento nas actividades desenvolvidas.

A pedido do estagiário, passamos a presente declaração para os devidos efeitos.

Mafambisse, aos 28 de Novembro de 2023

**Tongaathulett**  
Açucareira de Moçambique, SA  
Bernardo Cumbana  
DIRECÇÃO DE CAPITAL HUMANO  
MAFAMBISSE - DONDO

Sede: Fabrica e Plantações de Mafambisse · Estrada Nacional nr. 6 · Distrito de Dondo · Província de Sofala - Moçambique  
Telefones: Fixo +258 23 960 300 Celular +258 84 38 70 470 · MAFAMBISSE  
NUIT 400058709 · Número de Registo Comercial 100264501 · Capital Subscrito 1 506 471 409,00 MT

Email: [tongaathulett@whistleblowing.co.za](mailto:tongaathulett@whistleblowing.co.za) Website: [www.whistleblowing.co.za](http://www.whistleblowing.co.za) Whatsapp: +27 31 308 4664 -  
Mozambique Toll free 800 213 213

Tongaathulett Limited (Registration Number 1892/000610/06)