

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
UNIVERSIDADE ABERTA DO BRASIL
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
APLICADA AOS PROCESSOS PRODUTIVOS

Rodrigo Benetti

**ANÁLISE DE SISTEMA DE VAPOR DE ÁGUA SATURADO COM
VISTAS À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Camargo, RS
2017

Rodrigo Benetti

**ANÁLISE DE SISTEMA DE VAPOR DE ÁGUA SATURADO COM VISTAS À
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos (EaD), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Especialista em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos.**

Orientador: Alexandre Aparecido Buenos

Camargo, RS
2017

Rodrigo Benetti

**ANÁLISE DE SISTEMA DE VAPOR DE ÁGUA SATURADO COM VISTAS À
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos (EaD), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Especialista em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos**.

Aprovado em 29 de Julho de 2017:

Alexandre Aparecido Buenos, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Carlos Roberto Cauduro, Dr. (UFSM)

Giane dos Campos Grigoletti, Dr. (UFSM)

Camargo, RS
2017

RESUMO

ANÁLISE DE SISTEMA DE VAPOR DE ÁGUA SATURADO COM VISTAS À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

AUTOR: Rodrigo Benetti
ORIENTADOR: Alexandre Aparecido Buenos

A utilização racional e eficiente da energia representa reduções significativas no custo de um produto ou serviço. O aporte térmico utilizado nos processos da empresa Apolichs do Sul Indústria e Comércio de Materiais de Polimento LTDA, prestadora de serviços na área de polimento e lavagem de peças de aço inoxidável, é realizado por vapor d'água saturado. Apesar de recente, a planta de geração e distribuição de vapor não contempla totalmente a máxima eficiência energética. Este trabalho tem como objetivo analisar o sistema de geração e distribuição de vapor sob o ponto de vista da eficiência energética. A busca de soluções que contribuam para o melhor aproveitamento do combustível, bem como o melhor aproveitamento do calor gerado, são itens que norteiam o trabalho. Para este trabalho foi analisada a perda de calor através de um trecho da tubulação sem isolamento térmico e através das descargas de fundo manuais, a influência da umidade do combustível sobre o consumo, bem como a determinação do combustível mais econômico para o gerador de vapor e a viabilidade de substituição de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) por vapor no aquecimento de um dos equipamentos da empresa. As soluções apresentadas são justificadas economicamente através do método do Payback Simples, colocando-se em evidência o rápido retorno com a implementação das mesmas. A justificativa econômica é a maneira mais eficiente de se colocar um projeto de eficiência energética em prática, já que representa ganhos reais, na maioria das vezes primordiais para que a empresa mantenha seus produtos e serviços competitivos no mercado. Como resultado foi encontrado que a falta de isolamento na tubulação e descargas de fundo geram uma perda de R\$ 11.903,41 por ano. Já o aumento na umidade do combustível gera um aumento no consumo, podendo representar R\$ 9.969,83 anuais. Dentre os combustíveis analisados, o cavaco é o que apresenta maior economia para geração de vapor, correspondendo a uma redução de R\$ 42.692,88 por ano comparado com a lenha em toras. Além disso, a substituição do GLP por vapor se mostrou viável podendo gerar uma economia de R\$ 33.705,81 ao ano. A análise de Payback apresentou um retorno de 5,0 meses para o investimento com a substituição de GLP por vapor.

Palavras-chave: Vapor d'água saturado. Eficiência energética. Umidade do combustível. Automatização. Análise econômica.

ABSTRACT

ANALYSIS OF SATURATED WATER VAPOR SYSTEM WITH A VIEW ENERGY EFFICIENCY

AUTHOR: Rodrigo Benetti
ADVISOR: Alexandre Aparecido Buenos

The efficient and rational use of energy, represents significant reductions in the cost of a product or a service. The thermal input used at Apolichs do Sul Indústria e Comércio de Materiales de Polimento LTDA, company which provides services in the field of polishing and washing parts of stainless steel, is performed by saturated water vapor. Although recent, the steam generation and distribution plant does not fully contemplate maximum energy efficiency. This paper Aims to analyze a system of generation and distribution of steam, from an energy efficiency point of view. The search for solutions that contribute to the best use of the fuel, as well as the best use of the heat generated are the items that guide the paper. For this paper, were analyzed The loss of heat through a section of piping without thermal insulation and through manual bottom discharges, the influence of fuel moisture on consumption, as well as the determination of the most economical fuel for the steam generator and the feasibility of replacing heating for GLP of one of the equipment used at Apolichs do Sul Ind. e Com. de Mat. de Polimento, are the items analyzed in this paper. The solutions presented are economically justified through the Simple Payback method, highlighting the rapid return with the implementation of the same. The economic justification is the most efficient way to put an energy efficiency project into practice, since it represents real gains most of the time, It is essential for the companies to keep its products and services competitive in the market. As a result, it was found that the lack of insulation in the two-inch pipe and the bottom discharges generate an energy loss equivalent to R\$ 11.903,41 per year compared to log fires. The increase in the humidity of the fuel generates an increase in the consumption representing R\$ 9.969,83 of losses annual. Among the fuels analyzed, the wood chip is the one with the greatest savings for steam generation, corresponding to a reduction of R\$ 42.692,88 a year. In addition, the substitution of LPG by steam, has proved viable and could generate a saving of R\$ 33.705,81 a year. The Payback analysis presented a return of 5,0 months for the investment whith the replacement of LPG by steam.

Keywords: Saturated water steam. Energy efficiency. Fuel moisture. Automation. Economic analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Lenha de Eucalipto em toras.....	24
Figura 2 – Cavacos de Eucalipto.....	25
Figura 3 - Casa da Caldeira da Empresa Apolichs do Sul	27
Figura 4 - Trecho de tubulação de vapor sem isolamento térmico.....	35
Figura 5 - Lenha armazenada ao ar livre, sem proteção contra as intempéries.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Emissão de calor para tubulação de aço exposta ao ar (kcal/h.m.)	15
Tabela 2 - Influência do teor de umidade no PCI da lenha de eucalipto	20
Tabela 3 - Densidade do cavaco de madeira e PCI de acordo com a origem	20
Tabela 4 - Densidade da madeira considerada em função da umidade	31
Tabela 5 - Custo da energia para lenha em toras e cavaco	31
Tabela 6 - Vazão das válvulas em função da pressão e diâmetro	33
Tabela 7 - Considerações para cálculo de desperdício de calor através das descargas de fundo e economia resultante.....	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	10
1.1.1 Objetivo geral	10
1.1.2 Objetivos específicos	10
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	11
1.3 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA	11
2. REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1 GERADORES DE VAPOR	13
2.2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO E CONSUMO DE VAPOR	15
2.3 VAPOR D'ÁGUA SATURADO	16
2.4 RENDIMENTO TÉRMICO DE SISTEMAS DE VAPOR	17
2.5 COMBUSTÃO	18
2.6 UMIDADE DA BIOMASSA	19
2.7 PODER CALORÍFICO	19
2.8 ALGUMAS PESQUISAS EM SISTEMAS DE VAPOR	21
2.9 ANÁLISE DE INVESTIMENTOS	21
3. MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1 PLANEJAMENTO SEQUENCIAL	23
3.2 COMBUSTÍVEL.....	24
3.2.1 Lenha em toras e cavacos	24
3.2.2 Quantidade e umidade dos combustíveis	25
3.3 SISTEMA DE GERAÇÃO DE VAPOR	26
3.3.1 Caldeira	26
3.3.2 Sistema de distribuição	28
3.3.3 Análise de viabilidade	28
4. ANÁLISE DOS DADOS	29
4.1 QUANTIDADE DE VAPOR PRODUZIDO	29
4.2 DETERMINAÇÃO DO COMBUSTÍVEL MAIS ECONÔMICO	30
4.3 PERDA DE CALOR PELAS DESCARGAS DE FUNDO	32
4.4 TUBULAÇÃO SEM ISOLAMENTO TÉRMICO	35
4.5 CONSUMO DE BIOMASSA E UMIDADE DO COMBUSTÍVEL	37
4.6 SUBSTITUIÇÃO DO GLP POR VAPOR	39
4.7 RESUMO DAS MEDIDAS DE MELHORIA	40
5. CONCLUSÃO	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
APÊNDICE A – CONSIDERAÇÕES PARA OS CÁLCULOS DAS TABELAS 4 E 5	46
APÊNDICE B – CONSIDERAÇÕES PARA OS CÁLCULOS DA TABELA 7	47
APÊNDICE C – CONSIDERAÇÕES PARA OS CÁLCULOS DAS TABELAS 8 E 9	48
APÊNDICE D – CONSIDERAÇÕES PARA OS CÁLCULOS DA TABELA 10	49

APÊNDICE E – CONSIDERAÇÕES PARA OS CÁLCULOS DA TABELA 11	50
ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES MEDIDOR DE UMIDADE MINIPA MWD – 14A ...	51
ANEXO B – TABELA CONTROLE DE CONSUMO E UMIDADE DA LENHA	52
ANEXO C – ESPECIFICAÇÕES TERMÔMETRO INFRAVERMELHO MT-320	53
ANEXO D – INFORMAÇÕES DE RENDIMENTO DA CALDEIRA.....	54
ANEXO E – TABELA DE VAPOR D'ÁGUA SATURADO.....	55
ANEXO F – ORÇAMENTO AUTOMATIZAÇÃO DESCARGAS DE FUNDO	56
ANEXO G – PODER CALORÍFICO INFERIOR PARA VÁRIOS COMBUSTÍVEIS..	57

1. INTRODUÇÃO

A energia térmica é utilizada nos mais variados processos industriais, sendo essencial em procedimentos de secagem, desidratação, concentração, cozimento, produção de reações químicas e esterilização microbiológica. A gama de indústrias que utilizam esses processos é abrangente, incluindo indústrias de alimentos e bebidas, papel e celulose, têxtil, química, metalúrgica e farmacêutica. Na grande maioria delas, o aporte de calor é efetuado por meio de sistemas de vapor d'água, geralmente saturado, já que os processos demandam temperaturas relativamente baixas (BAZZO, 1992; NOGUEIRA, 2005a).

Segundo Nogueira (2005a), a escolha de vapor d'água se justifica pela disponibilidade de água, por sua baixa agressividade química e por transportar elevadas quantidades de calor com eficácia, aliado a taxas elevadas de transferência térmica por unidade de área.

Em qualquer processo industrial, a energia é um insumo fundamental, compondo parte dos custos de produção. A utilização de combustíveis fósseis e eletricidade, ainda que esta provenha de usinas hidrelétricas, gera impactos ambientais e geográficos. O uso racional das matrizes energéticas e a utilização de fontes de energia renováveis e menos poluentes vêm ganhando cada vez mais espaço, tanto para diminuir gastos com energia elétrica, como para fortalecer a imagem socioambiental da empresa (DOS REIS; DA CUNHA, 2006).

A eficiência dos sistemas e processos e a consequente racionalização energética vêm atraindo o interesse de técnicos, engenheiros e empresários. A causa desse empenho é a economia financeira representativa, atribuída ao menor consumo de energia para produzir o mesmo produto, além da redução dos impactos ambientais relacionados à sua produção.

No Brasil inúmeras plantas de geração de vapor são antigas e de pequeno porte. Devido a esse fator e à facilidade de obtenção de combustível, na maioria dos casos de origem vegetal e a baixos custos, não é dada à devida importância à operação e distribuição dentro do olhar crítico da eficiência energética. Em novas plantas e naquelas de maior porte, geralmente a preocupação com a eficiência está difundida e é um importante fator que contribui para a competitividade da empresa.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo analisar um sistema de geração e distribuição de vapor d'água saturado com vistas à detecção de

oportunidades de melhorias da eficiência energética. A partir da análise e da teoria apresentada foram propostas melhorias para o sistema.

Num primeiro momento foi realizada uma análise do sistema para identificação de melhorias que podem ser aplicadas à geração, ao isolamento térmico da tubulação e ao próprio processo. Após foram quantificados os ganhos possíveis com a implementação das mesmas, de maneira a justificar investimentos perante a diretoria da empresa Apolichs do Sul Indústria e Comércio de Materiais de Polimento LTDA. Ao final foram propostas alterações no sistema atual com o intuito de melhorar a eficiência energética do processo de geração de energia e reduzir os custos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar um sistema de geração, distribuição e utilização de vapor d'água saturado, apontando medidas de economia energética e avaliando o retorno e a viabilidade dos investimentos, justificando financeiramente melhorias que podem ser implementadas.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral foram definidos alguns objetivos específicos conforme segue abaixo:

- Analisar o sistema de geração atual, determinando a quantidade de vapor produzido e o combustível mais econômico para o gerador de vapor;
- Analisar o nível de automação do gerador de vapor, identificando locais em que a automação possa trazer ganhos à eficiência do sistema, como no caso das descargas de fundo;
- Analisar a tubulação de distribuição de vapor e quantificar as perdas de calor do sistema e possíveis medidas para a diminuição das mesmas;
- Analisar teoricamente a perda energética com a utilização de biomassa com teor de umidade elevado;

- Analisar os pontos consumidores de energia térmica fornecida por outras fontes, como o gás liquefeito de petróleo (GLP) avaliando a substituição por vapor d'água saturado.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em 5 capítulos principais, sendo que o capítulo 1 introduz o trabalho, define os objetivos geral e específicos, e apresenta a estrutura do trabalho proposto.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão dos conceitos básicos de geração e distribuição de vapor d'água saturado e dos fatores que afetam a eficiência desses sistemas. Ao final do capítulo é apresentado o método do Payback Simples, utilizado para justificar e analisar a viabilidade de investimentos econômicos.

O Capítulo 3 mostra as características do sistema analisado, os dados de interesse e a metodologia e instrumentos utilizados para a coleta dos mesmos.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões relacionados com o custo do vapor, a determinação do combustível mais econômico e as perdas através das descargas de fundo da caldeira e da falta de isolamento térmico de um trecho da tubulação condutora de vapor. A viabilidade de substituição do aquecimento de um dos equipamentos na empresa, atualmente utilizando GLP, por aquecimento por meio de vapor, também é analisada.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho proposto, bem como as sugestões para trabalhos futuros com intuito de permitir que outros autores deem continuidade a esse trabalho.

Ao final são apresentadas as referências bibliográficas com as literaturas consultadas para o desenvolvimento do trabalho. Também pode ser visto os apêndices e anexos que podem ser consultados para um melhor entendimento do trabalho.

1.3 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

A APOLICHS DO SUL INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE MATERIAIS DE POLIMENTO LTDA está localizada no município de Fagundes Varela, Rio Grande do Sul. A empresa presta serviço na área de polimento e lavagem de peças de aço

inoxidável, tendo como clientes principais a Tramontina Farroupilha, Tramontina TEEC e Tramontina Cutelaria.

Os produtos são recebidos em lotes de quantidades variadas. Na Apolichs é realizado o recebimento do material e a distribuição aos seus terceirizados, para que lá sejam polidos. Depois a própria Apolichs faz a coleta para realizar as operações de lavagem, seleção e embalagem das peças para retorno ao cliente.

Atualmente o grupo Apolichs e seus terceirizados empregam aproximadamente 240 pessoas, número bastante expressivo em uma cidade como Fagundes Varela, que possui uma população em torno de 2.600 habitantes.

A empresa, que possui todos seus investimentos em Fagundes Varela, tem como meta a melhoria contínua, aplicando tecnologias e desenvolvendo novas formas de polimento, com intuito de sempre atender, com qualidade e rapidez, seu maior cliente, a Tramontina.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica que embasou a realização deste trabalho. Serão apresentados conceitos de geração e distribuição de vapor, metodologias de cálculo para as perdas de calor e para a eficiência do sistema, bem como métodos para a análise de investimentos.

2.1 GERADORES DE VAPOR

Inúmeras características do vapor podem ser citadas para justificar sua escolha como meio de transporte de calor nos processos industriais. Entre elas, pode-se citar a não toxicidade, a grande disponibilidade de água, as altas taxas de eficiência do processo e de transferência de calor e a possibilidade de geração de calor num ponto centralizado e distribuição para os pontos de consumo da empresa. Na maioria dos processos industriais o vapor utilizado é o vapor saturado, com pressões inferiores a 1,0 MPa (BAZZO, 1992; PERA, 1990).

Os geradores de vapor, também conhecidos como caldeiras, são equipamentos que transformam energia térmica em vapor, trabalhando a pressões superiores à pressão atmosférica. A energia térmica pode vir de diversas fontes, como a biomassa, energia solar, combustíveis fósseis, entre outras. Os geradores de vapor atuais são constituídos de diversos equipamentos auxiliares, de forma a aumentar ao máximo a eficiência do sistema (BAZZO, 1992; PERA, 1990).

A fornalha ou câmara de combustão é o local onde se desenvolve a combustão, sendo que em unidades bem dimensionadas a maior parte da energia é absorvida por suas paredes. A caldeira propriamente dita compreende as partes onde é processada a mudança de fase da água (BAZZO, 1992).

Entre os equipamentos auxiliares adicionados à caldeira para que o aproveitamento de calor seja realizado de maneira mais eficiente, podem ser citados o economizador e o preaquecedor de ar. O primeiro utiliza o calor dos gases da chaminé para preaquecer a água de alimentação, enquanto o segundo também utiliza o calor dos gases, mas para aquecer o ar utilizado na combustão (NOGUEIRA, 2005a).

Neste trabalho, o termo caldeiras designará todo o conjunto do gerador de vapor, ou seja, toda a casa da caldeira e equipamentos anexos, fato que também é constatado no meio industrial.

Segundo Bizzo (2003), as caldeiras podem ser basicamente divididas em flamotubulares, aquotubulares e mistas.

Nas caldeiras flamotubulares, os gases provenientes da combustão passam por um ou mais passes pelo interior de tubos envoltos de água. Possuem custo de construção relativamente baixo, o que facilita sua aceitação no mercado, e geralmente são utilizadas em locais que se deseja baixo consumo de vapor a baixas pressões. A grande quantidade de água que essas caldeiras acumulam limita a pressão de operação segura, que varia de 0,686 MPa a 1,961 MPa (7,0 a 20,0 kg/cm²). Acima dessa pressão a espessura dos materiais aumenta consideravelmente, o que eleva o tamanho e o custo, inviabilizando sua produção.

A adaptação de grelhas para combustíveis sólidos possui elevada complexidade, fato que geralmente só é observado em caldeiras de pequeno porte. A maioria das caldeiras desse tipo opera com combustíveis líquidos ou gasosos. Outro inconveniente é a dificuldade de adaptação de equipamentos recuperadores de calor, o que limita os rendimentos desse tipo de caldeira entre 80,0 a 90,0% (BIZZO, 2003). De acordo com Nogueira (2005a), os máximos rendimentos calculados de acordo com a ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) para esse tipo de caldeira não superam 78,0% nas melhores condições de limpeza.

Na caldeira aquotubular os gases passam pelo lado externo dos tubos, aumentando a área de troca térmica. Com esse tipo de caldeira foi possível elevar a capacidade de geração de vapor e a pressão do mesmo. Certas unidades atingem a produção de 600,0 a 750,0 t/h com pressões de 14,71 MPa a 19,61 MPa (150,0 a 200,0 kgf/cm²). Devido à ampla fornalha de que podem ser dotadas, qualquer combustível pode ser utilizado, inclusive resíduos industriais e biomassa de elevado teor de umidade.

As caldeiras aquotubulares possuem tamanhos diminutos em relação a sua capacidade, devido às grandes áreas de troca térmica. Em relação à eficiência, calculada de acordo com normas da ASME, varia de 80,0 a 85,0% (Nogueira, 2005a).

As caldeiras mistas são uma junção dos dois tipos anteriores. Surgiram da necessidade de combustão de combustíveis sólidos, sendo constituídas

basicamente por uma câmara de combustão revestida de tubos de água e por um corpo de tubos por onde os gases são conduzidos por 2 ou 3 passes. O tamanho da câmara de combustão, onde estão instaladas grelhas, possibilita a queima de lenha em toras, cavaco, bem como combustíveis líquidos e gasosos com a instalação de queimadores apropriados. O rendimento dessas caldeiras é inferior ao rendimento das flamotubulares, porém pode ser aumentado com equipamentos como o preaquecedor de ar, facilmente instalado na saída dos gases da fornalha (Bizzo, 2003).

2.2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO E CONSUMO DE VAPOR

O sistema de distribuição de vapor é o responsável pela entrega do vapor produzido na caldeira até os pontos de consumo. É composto por tubos, conexões, válvulas, filtros e purgadores, entre outros. Deve ser dada a devida atenção na fase de projeto, onde será determinada a eficiência e os ganhos gerados durante toda a vida operacional da tubulação. Se mal projetado pode representar desde grandes perdas de pressão a perdas de calor e energia (NOGUEIRA, 2005a; TELLES, 1999).

O projeto da rede de distribuição de vapor deve adotar medidas que mitiguem as perdas energéticas. Entre elas, a drenagem adequada das tubulações, a purga de ar do sistema e o isolamento térmico da tubulação. A Tabela 1 apresenta a perda de calor por uma tubulação sem isolamento térmico.

Tabela 1 - Emissão de calor para tubulação de aço exposta ao ar (kcal/h.m.)

Diferença de temperatura [°C]	Diâmetro da tubulação [mm]								
	15	20	25	32	40	50	65	80	100
50	48,18	58,51	70,55	86,04	97,23	117,02	144,55	164,34	207,36
60	59,37	73,14	87,76	107,55	120,46	146,27	178,97	204,78	256,41
70	72,28	87,76	106,69	130,78	146,27	177,25	216,83	248,66	309,75
80	86,04	104,97	127,34	154,88	173,80	210,80	257,27	295,12	368,26
100	116,16	141,11	171,22	209,08	234,03	283,94	346,75	399,24	496,46
120	148,85	180,69	220,27	269,31	302,01	366,54	449,14	516,25	641,87
140	185,85	225,43	274,47	336,42	377,72	458,60	561,85	646,18	805,35
160	226,29	274,47	334,70	409,56	460,33	560,13	687,48	789,87	985,18

Fonte: Adaptação de Nogueira (2005b).

O dimensionamento das redes de vapor também deve obedecer a fatores econômicos. O diâmetro e espessura das tubulações deve ser dimensionado evitando excessos, o que acarreta grande economia na implementação do sistema.

2.3 VAPOR D'ÁGUA SATURADO

Quando é fornecida determinada quantidade de calor à água em estado líquido ocorre sua mudança de fase. O estado gasoso da substância é definido como vapor. Vapor d'água saturado pode ser definido a partir de duas propriedades, como temperatura e pressão. Qualquer alteração de um dos parâmetros poderá alterar o estado do mesmo, tanto para líquido como para vapor superaquecido (VAN WYLEN, 2003).

A utilização de vapor d'água saturado é facilitada devido à característica acima. Temperaturas de processo são facilmente controladas de forma mecânica, sem necessidade de sensores e controladores eletrônicos, utilizando para isso válvulas controladoras de pressão. O sistema é barato e eficiente, possuindo pouca variação nas temperaturas de processo, bem como atinge as mesmas de forma rápida (BAZZO, 1992; NOGUEIRA, 2005a).

Outra característica favorável à utilização de vapor saturado é a capacidade de ceder grande parte da energia que recebeu na caldeira para o processo. Durante a condensação, o vapor transfere o calor latente, que representa grande parte da energia nele contida. A única energia remanescente é o calor sensível, presente no condensado, que ainda pode ser direcionado à caldeira, aumentando a eficiência da mesma.

O vapor gerado na caldeira não é totalmente seco, ou seja, nem toda água está na forma de vapor. Uma parcela de água em estado líquido é arrastada para a tubulação a partir do próprio tubulão da caldeira, enquanto outra se forma pela perda de calor. A relação entre a quantidade de líquido presente no vapor é denominada título. Quanto mais próximo de 1, melhor a qualidade do vapor, ou seja, quanto mais seco, maior a quantidade de energia disponível e melhor a transferência de calor nos processos subsequentes (NOGUEIRA, 2005a).

O vapor d'água pode ser considerado uma substância pura, ou seja, a composição química não varia em função da pressão, temperatura e das mudanças de fase relacionadas às mesmas. O vapor d'água saturado é uma substância pura

simples compressível e a determinação de duas propriedades independentes, como a pressão e o volume específico, são capazes de determinar o estado físico do mesmo. Devido à grande aplicação do vapor em meios industriais, essas propriedades foram estudadas e tabeladas, o que facilita a determinação do estado do vapor e de outras propriedades importantes, como a entalpia e a entropia, propriedades importantes na análise de transferência de calor (NOGUEIRA, 2005a).

2.4 RENDIMENTO TÉRMICO DE SISTEMAS DE VAPOR

De maneira geral, o rendimento térmico dos sistemas pode ser definido como a relação entre o calor fornecido ao sistema e o calor efetivamente utilizado, seja para gerar trabalho ou aquecimento (NOGUEIRA, 2005a).

O rendimento térmico nos sistemas de vapor pode ser dividido basicamente entre o rendimento obtido na caldeira a partir da queima de combustível, e o rendimento da troca térmica realizada pelos equipamentos que consomem vapor (Nogueira, 2005b).

O rendimento da caldeira pode ser calculado através do método direto, que considera o gerador como um volume de controle, dividindo a energia de saída contida no vapor pela energia fornecida a ele na caldeira. O método é bastante simplificado, além de que as variáveis necessárias muitas vezes não conseguem ser quantificadas com a devida precisão (BAZZO, 1992; PERA, 1990).

O método indireto, utilizado nos casos em que se deseja mais precisão, considera cada perda de calor através do sistema. No final, as perdas são somadas e divididas pelo calor fornecido, o que resulta na eficiência do equipamento (Nogueira, 200b).

As perdas de calor utilizadas para o cálculo de eficiência pelo método indireto são (Nogueira, 2005b):

- Perdas pelos gases exauridos (chaminé);
- Perdas de calor pelo costado da caldeira, por radiação e convecção;
- Perdas por purgas (descargas de fundo para limpeza de depósitos da parte interna da caldeira);
- Perdas de calor através das cinzas;
- Perdas de calor por combustível não queimado.

Das perdas citadas acima, a perda de calor pelos gases da chaminé tem maior representatividade. Ações para manter o excesso de ar próximo ao ideal, como a automatização do sistema de suprimento de ar, podem auxiliar no aumento da eficiência da caldeira (Nogueira, 2005a).

Em geradores de vapor, bem como nos sistemas de distribuição, o projeto contribui com parcela significativa no rendimento do sistema. Na elaboração do projeto e na definição do equipamento ideal para o processo devem-se analisar os aspectos de fabricação e controle das perdas, evitando equipamentos sub ou sobre dimensionados, operando fora da faixa de maior eficiência. O custo para se adotar medidas de eficiência energética é consideravelmente menor na parte de projeto do que a respectiva implementação de melhorias no sistema em funcionamento. Por vezes, soluções simples e altamente viáveis se adotadas na fase de projeto não são viáveis de serem aplicadas ao sistema já pronto (BAZZO, 1992; NOGUEIRA, 2005b).

2.5 COMBUSTÃO

De acordo com Pera (1990), o processo de combustão desenvolvido na fornalha da caldeira, é a reação química do combustível com o oxigênio, liberando grandes quantidades de energia térmica, sendo então aproveitadas para a geração do vapor. Como produtos da combustão têm-se gases quentes, liberados através da chaminé, e as partes sólidas presentes no combustível, que constituem as cinzas.

O oxigênio utilizado é proveniente do ar, sendo que representa 21,0% em volumetria ou 23,0% em peso atômico. O restante da composição do ar são outros gases inertes que somente arrastam calor para fora do sistema, como o nitrogênio. A umidade do ar também é outro fator que contribui para perdas no sistema, já que a massa d'água presente no ar também absorve energia ao passar pela fornalha (Nogueira, 2005a; Pera, 1990).

A oxidação completa do combustível requer uma quantidade específica de ar para fornecer a massa necessária de oxigênio. Pouco ar ocasiona combustões incompletas, enquanto o excesso gera elevadas perdas através dos gases. Uma redução de 15,0% no excesso de ar pode representar um aumento de 1,0% na eficiência global da caldeira (NOGUEIRA, 2005a; PERA,1990).

Ainda de acordo com Nogueira (2005a) e Pera (1990), conhecendo-se a composição química do combustível e nas reações estequiométricas podem ser determinadas as quantidades de ar necessárias. Para garantir a reação completa do combustível, ar em excesso é fornecido. A quantidade de excesso de ar deve ser monitorada e regulada frequentemente, pois a redução do excesso de ar em 15,0% apresenta um aumento na eficiência da caldeira de 1,0%, o que representa grande economia para a empresa.

2.6 UMIDADE DA BIOMASSA

De acordo com Foelkel (2016), o teor de umidade, ou simplesmente umidade do combustível, pode ser determinado de dois modos distintos, cujos resultados são totalmente diferentes. A indústria da madeira prefere expressar a umidade em função da massa seca final (MS), de acordo com a Equação (1):

$$\text{Umidade base Massa Seca (\%)} = \frac{100 * [\text{Massa úmida} - \text{Massa seca}]}{\text{Massa seca}} \quad (1)$$

Para as indústrias de celulose e papel, bem como para aquelas que utilizam a biomassa como fonte energética, o teor de umidade é função da massa úmida inicial (MU), de acordo com a Equação (2):

$$\text{Umidade base Massa Úmida (\%)} = \frac{100 * [\text{Massa úmida} - \text{Massa seca}]}{\text{Massa úmida}} \quad (2)$$

Seguindo a padronização de Foelkel (2016), será adotada a umidade base da massa úmida no desenvolvimento desse trabalho.

A umidade da biomassa é um dos parâmetros que influenciam fortemente o consumo de combustível das caldeiras. A biomassa pode chegar ao local consumidor apresentando teores de umidade elevados, como 50,0% para eucaliptos recém abatidos, como pode apresentar índices de umidade abaixo de 20,0%, caso a lenha seja empilhada para a secagem (Pera, 1990).

2.7 PODER CALORÍFICO

Pera (1990) define o poder calorífico como a quantidade de calor obtida a partir da combustão de determinada massa de combustível à pressão constante.

De acordo com Pera (1990) e Nogueira (2005a), o poder calorífico pode ser apresentado de duas formas distintas. O Poder Calorífico Superior (PCS), que é a soma da energia liberada pelo combustível considerado com a energia gasta para vaporização da água que se forma durante a combustão, e o Poder Calorífico Inferior (PCI), que representa a energia líquida liberada em forma de calor que o combustível tem capacidade de fornecer.

A Tabela 2, adaptada de Nogueira (2005b), apresenta o Poder Calorífico Inferior (PCI) para diversos teores de umidade da lenha de eucalipto.

Tabela 2 - Influência do teor de umidade no PCI da lenha de eucalipto

UMIDADE [%]	PCI [kcal/kg]	UMIDADE [%]	PCI [kcal/kg]
0	4438,3	45	2171,1
5	3186,4	50	1919,2
10	3934,5	55	1667,3
15	3682,6	60	1415,3
20	3430,7	65	1163,4
25	3178,8	70	911,5
30	2926,8	75	659,6
35	2674,9	80	407,7
40	2423,0	85	155,8

Fonte: Adaptação de Nogueira (2005b).

A Tabela 3, retirada do site do fornecedor de cavacos Cavacos Brasil¹, apresenta a densidade e o poder calorífico inferior (PCI) do cavaco de eucalipto, obtido a partir de diversas formas, em função da umidade.

Tabela 3 - Densidade do cavaco de madeira e PCI de acordo com a origem

UMIDADE [%]	DENSIDADE [kg/ M ³]	PCI [kcal/kg]	ORIGEM
20	230	3000	Reciclado
30	300	2600	Floresta
40	370	2400	Floresta / serraria
45	400	2200	Serraria
50	430	2000	Serraria

Fonte: Cavacos Brasil.

¹ Disponível em <http://www.cavacosbrasil.com.br/servicos.php>

2.8 ALGUMAS PESQUISAS EM SISTEMAS DE VAPOR

Nascimento (2007) realizou um estudo para determinar a participação energética do uso de lenha de eucalipto e de cavaco produzido a partir de resíduos de serrarias numa caldeira do tipo mista instalada numa indústria Seropédica na cidade de Duartina, São Paulo, nos anos de 2004, 2005 e 2006. O autor avaliou a participação das quantidades de energia direta e indireta necessárias para produzir e entregar os combustíveis no ponto de consumo. A conclusão foi que a quantidade de energia necessária para se produzir a mesma quantidade de vapor com lenha era 26,88% maior do que se fosse utilizado o cavaco produzido nas serrarias próximas. A maior participação de energia, no caso da lenha, era a fóssil devido à distância de transporte.

Aguiar (2014) determinou a eficiência de um gerador de vapor aquatubular, com pressão de operação de 1,04 MPa (10,6 kgf/cm²) e capacidade de 20,0 ton/h através do método indireto. O autor concluiu que as maiores perdas foram relativas aos gases expelidos na chaminé, sendo que os mesmos carregam consigo grande parte de calor residual. A perda de calor pelos gases é fortemente influenciada por fatores como a temperatura ambiente e principalmente pelo teor de umidade do combustível.

Salum (2011) identificou os potenciais de economia energética numa caldeira de recuperação. Segundo o autor, a implementação de conversores de frequência para o controle da insuflação de ar no sistema através do controle da velocidade dos motores dos ventiladores eliminaria o controle manual. A combustão na caldeira operando em modo manual é variável, por vezes operando com excesso de ar e outras com deficiência de ar. O autor conclui que a economia de energia com a instalação dos conversores de frequência pode representar 80,0% do consumo atual da instalação.

2.9 ANÁLISE DE INVESTIMENTOS

De acordo com Nogueira (2005a) as decisões sobre medidas de melhoria de eficiência energética passam necessariamente por uma análise de investimentos, onde são analisadas a atratividade e a viabilidade de tais medidas.

Para a realização desse trabalho será utilizado o método de retorno de capital, também conhecido como *Payback*, por ser um método bastante utilizado e simples de ser aplicado e compreendido. Quando não leva em consideração a taxa de juros, o *payback* simples. O *Payback* Simples pode ser definido como o tempo necessário para que os benefícios (ou a economia) se igualem aos investimentos, e pode ser dado pela Equação (3):

$$Payback_{simples} = \frac{Investimento}{Economia} \quad (3)$$

Onde:

Payback simples: tempo de retorno do investimento [anos];

Investimento: Investimento inicial [R\$];

Economia: Benefícios [R\$/ano].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A descrição do sistema analisado, a realização da coleta dos dados necessários e os materiais e métodos utilizados são descritos nas seções a seguir.

3.1 PLANEJAMENTO SEQUENCIAL

Para definição do combustível mais econômico e para analisar a influência da umidade na eficiência do gerador de vapor, bem como para quantificar as perdas de calor através do trecho de tubulação não isolada e das descargas de fundo manuais, foi definido o procedimento a seguir:

Definição dos combustíveis: nessa etapa foram definidos os combustíveis a serem utilizados no gerador de vapor: lenha em toras e cavaco de eucalipto. Foi utilizada somente lenha em toras por ser o único combustível disponível durante o período de estudo. Para o cavaco foram efetuados cálculos teóricos de acordo com o poder calorífico do mesmo.

Definição dos equipamentos: nessa etapa foi definido que a quantidade de perda de calor através de um trecho de tubulação não isolada e das descargas de fundo manuais seria quantificada. Para isso foi efetuada a medição da temperatura da tubulação de vapor com um termômetro infravermelho e a vazão mássica através das válvulas de descarga de fundo manual foi estimada através de gráficos de vazão do fabricante. Também foi definido que seria analisada a viabilidade econômica de substituição de aquecimento de um dos equipamentos de processo da empresa, realizado atualmente por um aquecedor a gás, por um trocador de calor com utilização de vapor d'água saturado.

Medição de vapor produzido: como o gerador de vapor não possui medidor de vazão de vapor, a quantidade de vapor saturado foi estimada através da vazão da bomba, considerando-se que a caldeira opera em regime permanente.

Medição de umidade da lenha: para efetuar a medição da umidade da lenha foi definido que seria utilizado um medidor de umidade portátil, do tipo resistivo. A medição foi realizada somente na lenha em toras, utilizando-se o processo de medição indicado no manual do equipamento. Uma adaptação do método utilizado por Donato (2013) também foi utilizada.

Análise dos resultados: a partir dos dados coletados foram quantificadas as perdas de calor e a representatividade econômica das mesmas. Foi realizada a análise de viabilidade econômica através do método do Payback Simples para as soluções propostas.

3.2 COMBUSTÍVEL

Nessa seção serão apresentados os combustíveis empregados no estudo, bem como as características que afetam a eficiência energética do sistema e que serão analisadas em cada um deles.

3.2.1 Lenha em toras e cavacos

Na análise proposta neste trabalho foram selecionadas lenha em toras e cavacos (ambos de eucalipto) como combustíveis (Figuras 1 e 2) para abastecer a caldeira.

Figura 1 – Lenha de Eucalipto em toras.



Fonte: Autor.

A lenha em toras e o cavaco são produzidos a partir de eucaliptos plantados na região. As características da lenha de eucalipto, como o poder

calorífico inferior em função do teor de umidade podem ser vistas nas Tabelas 3 e 4 acima.

Figura 2 – Cavacos de Eucalipto.



Fonte: Autor.

3.2.2 Quantidade e umidade dos combustíveis

A obtenção da umidade da lenha foi realizada utilizando um medidor do tipo resistivo e portátil, modelo MWD-14A, da marca Minipa. As principais especificações podem ser vistas no Anexo A. O equipamento possui uma precisão de $\pm 1,0\%$ na faixa de 5,0% a 40,0% de umidade.

De acordo com Donato (2013), que realizou um estudo comparativo entre o método de obtenção de umidade gravimétrico da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e utilizando dispositivos portáteis com medidores resistivos e capacitivos, as medições divergem em todos os métodos. O autor aponta a diferença entre os métodos de medição do equipamento como a causa para a diferença nas medições.

Para a realização das medições, seguiu-se as instruções contidas no manual do equipamento. O método de seleção de amostras adotado por Donato (2013) foi adaptado para o presente estudo. As toras de lenha foram classificadas de acordo com o diâmetro em três classes: 8-15 cm, 16-25 cm e 26 cm ou mais. A partir de então, foram selecionadas três amostras para cada classe de diâmetro e, com uma

serra, realizado um corte transversal, aproximadamente na metade da tora. Utilizando o medidor de umidade, foram inseridas as pontas do mesmo no centro da tora em duas direções distintas e então realizada a média das medições. A medição foi realizada num único dia, por não ser viável a medição contínua da variável pelos operadores da caldeira. A tabela utilizada para a coleta de dados, bem como os dados coletados, pode ser vista no Anexo B. A umidade média obtida foi de 38,89%, sendo que para facilitar os cálculos será adotada a umidade de 40%.

A obtenção da massa da lenha na umidade de 40% foi realizada utilizando-se uma paleteira balança Marca Paletrans, modelo TM2000 Balança 700. Foi realizada a medição de um palete de lenha com as seguintes dimensões, em metros: 1,10 x 1,40 x 1,50, totalizado 2,31 st (metro estéreo, segundo Pera (1992), volume de lenha em toras empilhadas contido num volume de 1m x 1m x 1m). A massa líquida da lenha contida no palete foi de 1090,0 kg, obtendo-se a densidade de 471,86 kg/st para a umidade de 40,0%.

3.3 SISTEMA DE GERAÇÃO DE VAPOR

Esta seção apresenta as características do sistema de geração e distribuição de vapor d'água saturado sob análise. Serão caracterizados o modelo de caldeira, bem como o sistema de distribuição de vapor. Os pontos que apresentam relevância na eficiência do sistema, bem como possibilidades de melhoria são descritos aqui.

3.3.1 Caldeira

A caldeira que está instalada na empresa Apolichs do Sul é de fabricação da empresa Secamaq (SCH Máquinas e Equipamentos LTDA), modelo SCHM – 2.5. É uma caldeira do tipo mista, com capacidade de geração de 2,0 toneladas de vapor por hora a uma Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA) de 1,03 MPa (10,5 kg/cm²). A fornalha comporta a queima de cavaco e de lenha em toras. É dotada de três passes de gases, o que garante a máxima eficiência na troca de energia entre os gases de combustão e a água que está sendo transformada em vapor (Databook da Caldeira, 2012).

A tiragem é forçada por meio de um exaustor e de um ventilador de ar. Os dutos são dotados de dampers automáticos, que fecham e abrem de acordo com a queda de pressão do sistema, ajustada para 0,588 MPa (6,0 kgf/cm²), com variação de 0,098 MPa (1,0 kgf/cm²). O ar de entrada passa através de um preaquecedor de ar, que tem a função de absorver energia dos gases de exaustão, diminuindo a temperatura dos mesmos. A casa da caldeira está demonstrada na Figura 3.

Figura 3 - Casa da Caldeira da Empresa Apolichs do Sul



Fonte: Autor

De acordo com Nogueira (2005b), a redução de 20,0°C na temperatura dos gases proporciona um aumento de 1,0% no rendimento da caldeira, advindos tanto da recuperação de calor quanto da melhoria da combustão.

A maior parte do condensado produzido na planta é retornado ao tanque de alimentação da caldeira, sendo que a temperatura de entrada da água de alimentação fica entre 75,0°C e 80,0°C. Isso reduz gastos com água limpa e com tratamento de efluentes, bem como gastos energéticos para elevar a temperatura da água a esse novo patamar (Nogueira, 2005a).

O sistema de descarga de fundos é realizado de forma manual através da abertura de cinco válvulas de esfera. Na parte ambiental, além do aumento da eficiência, pode-se citar como medidas que atenuam a poluição a adoção de um filtro de gases do tipo ciclone logo antes do exaustor de tiragem. Esse filtro separa

as minúsculas partículas de cinzas que de outra forma seriam lançadas na atmosfera.

3.3.2 Sistema de distribuição

A tubulação principal de vapor é constituída por uma tubulação de 3 polegadas que chega a um distribuidor de vapor, que divide a planta em dois ramais, um principal de 3 polegadas para o interior da fábrica e um segundo ramal de 2 polegadas que atende 2 equipamentos externos. A operação pode ser efetuada independentemente em qualquer um dos ramais com a seleção da rede adequada no distribuidor de vapor. A maior parte da tubulação da empresa é nova, sendo que foram adotadas medidas de conservação e uso racional do vapor, como isolamento térmico e drenagem das tubulações, bem como a purga de ar do sistema.

Ainda assim, no segundo ramal, resta um trecho de 25,0 metros de tubulação de 2 polegadas que não está isolado. A perda de vapor desse trecho será estimada através da medição da temperatura da superfície da tubulação, determinando o valor desperdiçado anualmente com a falta de isolamento adequado.

A medição da temperatura da tubulação foi realizada utilizando-se um termômetro infravermelho com mira a laser, modelo MT-320, da marca Minipa, especificações no Anexo C. Os dados foram coletados conforme as indicações para obtenção das medições contidas no manual do equipamento. Foram realizadas três medições, resultando numa temperatura média de 152,2 °C. Para efeitos de cálculo a temperatura da tubulação considerada é de 150,0 °C, e a temperatura ambiente de 20,0 °C.

3.3.3 Análise de viabilidade

A viabilidade das melhorias propostas que exijam investimentos econômicos para implantação será justificada através do método do *Payback* Simples, apresentado na seção 2.9. As perdas energéticas serão quantificadas economicamente e comparadas com os orçamentos, determinando o tempo de retorno do investimento. Desse modo a tomada de decisão por parte da diretoria da empresa é facilitada, contribuindo para que as melhorias propostas sejam colocadas em prática.

4. ANÁLISE DOS DADOS

A partir dos dados e informações coletadas serão elaboradas propostas de melhorias com as respectivas análises de investimento, justificando junto à diretoria da empresa Apolichs do Sul a aplicabilidade de recursos para o aumento da eficiência energética do sistema de vapor d'água saturado. As considerações utilizadas nos cálculos são apresentadas no Apêndice.

4.1 QUANTIDADE DE VAPOR PRODUZIDO

De acordo com Nogueira (2005b), índices de referência devem ser obtidos do sistema analisado. Desse modo, torna-se possível comparar a instalação com sistemas teóricos ou com outras instalações que possuam as mesmas características, determinando se a eficiência está dentro dos níveis aceitáveis. Também é possível comparar os índices atuais de funcionamento com o histórico do sistema, ajudando na identificação de falhas ou de oportunidades de melhoria no sistema. Os índices mais utilizados são a eficiência da caldeira, o custo unitário de vapor e a necessidade de energia do produto final.

Um índice direto é o custo unitário do vapor produzido. Para obtenção do mesmo, há a necessidade de quantificar o vapor produzido pela caldeira e o consumo de combustível.

A caldeira objeto de estudo, por ser uma unidade pequena e estar a pouco tempo em operação não possui medidor de vazão de vapor. Equipamentos de medição de vapor são caros, e não são economicamente viáveis para a empresa. Como o acesso a equipamentos de medição portáteis também é difícil, visto que seu preço também é elevado, não foi possível a medição direta do consumo de vapor nesse trabalho.

Foi levantada a possibilidade de obter-se a vazão de vapor de forma estimada considerando-se a caldeira como um volume de controle operando em regime permanente e aplicando a Equação da Continuidade, que, de acordo com Brunetti (2008) diz que em regime permanente as vazões mássicas de entrada e saída são iguais, ou seja, a massa de vapor produzida é igual à massa de água injetada na caldeira pela bomba. A partir dessa dedução, o tempo de funcionamento da bomba seria medido a partir de um horímetro, acionado pela saída elétrica de ligação da

bomba, durante um dia de controle do consumo de combustíveis. A partir da curva característica da bomba, da pressão de funcionamento da caldeira e do tempo de funcionamento da bomba, a vazão de vapor seria estimada.

Indo a campo e observando-se as variáveis necessárias para estimar o consumo de vapor conforme o procedimento descrito acima, percebeu-se que os erros incorridos por esse método seriam altos. Entre os fatores que dificultam uma estimativa consideravelmente precisa, pode-se indicar:

- A bomba é acionada dentro de uma faixa do nível indicado na garrafa de nível da caldeira, dificultando que o nível inicial e final de água seja igual. Qualquer variação do nível pode representar massa expressiva de vapor de forma errada;
- A pressão da caldeira varia entre 0,490 MPa e 0,686 MPa (5,0 e 7,0 kgf/cm²), dificultando a leitura de vazão da bomba através do gráfico;
- A variação na temperatura da água de alimentação, também variando a vazão da bomba;
- Descargas de fundo são manuais, com tempos diferentes de acionamento, também difíceis de ser quantificados.

Devido às dificuldades apresentadas para a medição do consumo de vapor, foi solicitado ao fabricante da caldeira (Sch Máquinas e Equipamentos Ltda) os índices de rendimento médio de caldeiras do mesmo modelo. Segundo informações repassadas pela engenharia da empresa, o rendimento médio para caldeiras que operam com lenha é de 84,0% e com cavaco 85,0%, com variação de $\pm 1,5\%$, dependendo das condições ambientes e de operação. Esses dados podem ser visualizados no Anexo D.

4.2 DETERMINAÇÃO DO COMBUSTÍVEL MAIS ECONÔMICO

Para determinação do combustível mais econômico a ser utilizado na caldeira (lenha em toras ou cavaco), foi realizado um cálculo baseado no poder calorífico de ambos os combustíveis para 30,0% de umidade e a eficiência da caldeira fornecida pelo fabricante, conforme Anexo D. O custo da energia foi baseado no preço médio do metro estéreo de lenha e cavaco pagos pela empresa aos fornecedores no ano de 2017. A densidade da lenha foi obtida através da medição de massa de um palete de lenha a 40,0% de umidade. Os resultados podem ser vistos no Anexo B. A

partir de então, utilizando-se a Equação (2), foi calculada a massa seca para a umidade de 0,0%. Com o auxílio do Excel a Equação (2) foi automatizada e então foi construída a Tabela 4 que apresenta a densidade em função da umidade para a lenha considerada.

Tabela 4 - Densidade da madeira considerada em função da umidade

Umidade (%)	Densidade (kg/st)
0	283,1
5	298,0
10	314,6
15	333,1
20	353,9
25	377,5
30	404,5
35	435,6
40	471,9

Fonte: Autor.

A Tabela 5 apresenta as considerações e resultados dos cálculos para o custo da energia para cada tipo de combustível utilizado, efetuados no software Microsoft Excel. O Poder Calorífico Inferior (PCI) da lenha com umidade de 30,0% pode ser visto na Tabela 2. A densidade e PCI do cavaco utilizados nos cálculos constam na Tabela 3.

De acordo com os cálculos apresentados na Tabela 5, verificou-se que o custo da energia obtida a partir de cavaco de eucalipto, em R\$/Gcal, representa 75% do custo da energia obtida a partir de lenha em toras de eucalipto. Com a utilização de cavaco seriam economizados R\$ 3.557,74/mês, um total de R\$ 42.692,88/ano (valores válidos para o ano de 2017).

Tabela 5 - Custo da energia para lenha em toras e cavaco

Combustível, umidade de 30%	Lenha de Eucalipto	Cavaco de Eucalipto	Unidade
Custo estéreo	70,00	35,00	R\$/st
Densidade	404,5	300,0	kg/st
PCI	2.926,8	2600,0	kcal/kg
Rendimento da caldeira	84,0	85,0	%
PCI	1,18	0,78	Gcal/st

(continua)

Tabela 5 - Custo da energia para lenha em toras e cavaco

Combustível, umidade de 30%	Lenha de Eucalipto	Cavaco de Eucalipto	(conclusão) Unidade
Custo	70,39	52,79	R\$/Gcal
Relação custo cavaco/lenha em toras	0,75	-	-
Consumo mensal aproximado	203,28	-	st
Valor mensal, lenha em toras	14.229,60	-	R\$
Valor mensal, cavaco	10.671,86	-	R\$
Economia mensal com utilização de cavaco	3.557,74	-	R\$

Fonte: Autor.

Além disso, deve ser mencionado que a operação da caldeira seria facilitada, já que não dependeria do abastecimento manual como é efetuado com a lenha em toras. O abastecimento automatizado também resultaria na melhora de eficiência da queima da caldeira. Por essa razão, o consumo de cavaco poderá ser ainda mais reduzido que o calculado, resultando em economia ainda mais representativa. Também deve ser levado em consideração que já existe um espaço, com cobertura, destinado ao cavaco, protegendo-o das intempéries (umidade) e que o mesmo pode ser fornecido diariamente pelo fornecedor dentro de limites de umidade estipulados, sem a necessidade de ter-se um grande volume em estoque na empresa.

4.3 PERDA DE CALOR PELAS DESCARGAS DE FUNDO

As descargas de fundo tem a função de remover os sólidos que se depositam no fundo da caldeira devido aos sais presentes na água de alimentação, evitando a incrustação do gerador de vapor.

Na caldeira estudada, as descargas de fundo são realizadas de forma manual através de cinco válvulas, sendo quatro das mesmas de 2" e uma de 1". Conforme recomendação do fabricante da caldeira, as descargas de todas as válvulas devem ser realizadas no intervalo de uma hora, ou seja, uma válvula deve ser acionada a cada 12,0 minutos, durante o tempo de 5,0 segundos. Porém, verificando a operação da caldeira e monitorando o tempo das descargas, obteve-se um tempo médio de 10,0 segundos em cada válvula, bem como a variação do tempo entre as descargas, tanto para mais quanto para menos. Devido à inconstância entre as

descargas, a água de alimentação não é mantida dentro dos parâmetros considerados ideais, o que poderá trazer danos à eficiência e à segurança da caldeira, bem como futuros gastos com manutenção.

Pensando na possibilidade de ganho energético, na melhoria do processo e melhor qualidade da água utilizada pela caldeira, foi sugerida a implantação de atuadores pneumáticos para as válvulas, adaptáveis nas válvulas existentes, controlados automaticamente via CLP (Controlador Lógico Programável). O sistema permite o ajuste de tempo entre as descargas a qualquer momento.

Inicialmente, a frequência entre as descargas será mantida a mesma da recomendada para as descargas manuais, pelo tempo indicado pelo fabricante da caldeira, ou seja, 5,0 segundos. Os parâmetros químicos da água serão monitorados com maior frequência, de modo que o tempo entre a abertura das válvulas possa ser ajustado iterativamente até se obter o tempo ótimo entre a qualidade da água e o menor número possível de descargas, reduzindo ao máximo os desperdícios de energia.

Para os cálculos de vazão de água através das válvulas serão utilizados os dados constantes na Tabela 6 e a tabela de vapor do Anexo E.

Tabela 6 - Vazão das válvulas em função da pressão e diâmetro

Pressão (MPa)	Diâmetro da Válvula (Polegadas)			
	0,5	1,0	1,5	2,0
0,69	1,3	2,7	6,0	8,0
1,05	2,0	3,6	7,4	10,0
1,40	2,1	3,8	8,1	11,2
1,75	2,2	4,0	8,8	12,3
2,10	2,3	4,1	9,0	13,2
2,45	2,4	4,2	9,2	14,0
2,80	2,5	4,3	9,4	15,0

Fonte: Adaptação de Projeto de Sistema de Vapor, Spirax Sarco. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/marcosromanholo7/parte-02-gerao-de-vapor>.

A Tabela 7 apresenta as considerações para o cálculo e o valor de economia anual resultante. De acordo com os resultados apresentados na mesma, com a automatização das descargas de fundo a economia anual é de R\$ 8.836,73 (valores válidos para o ano de 2017).

Tabela 7 - Considerações para cálculo de desperdício de calor através das descargas de fundo e economia resultante

Item	Valor	Unidade
Válvulas de 2"	4,0	Unidades
Válvulas de 1"	1,0	Unidades
Pressão considerada	0,69	MPa
Vazão válvula de 2" à pressão considerada	8,0	l/s
Vazão válvula de 1" à pressão considerada	2,7	l/s
Número de acionamentos manuais por válvula	1,0	Acionamento/h
Tempo médio de abertura, acionamento manual	10,0	Segundos
Número de acionamentos automatizados por válvula	1,0	Acionamento/h
Tempo médio de abertura, acionamento automatizado	5,0	Segundos
Diferença entre os tempos de abertura (base para o cálculo de desperdício)	5,0	Segundos
Tempo de operação da caldeira, considerando 16 horas diárias, 22 dias úteis/mês e 12 meses/ano	4.224,0	Horas/ano
Número de acionamentos por válvula	4.224,0	Acionamentos válvula/ano
Calor sensível da água, à pressão de 0,69 MPa (7,0 kg/cm ²)	171,3	kcal/kg
Volume anual das descargas de fundo, total (descarga automatizada)	732.864	l/ano
Volume anual das descargas de fundo desperdiçados com descarga manual	732.864	l/ano
Calor desperdiçado anualmente através das descargas de fundo	125,54	Gcal/ano
Custo Gcal, combustível lenha (Tabela 5)	70,39	R\$/Gcal
Valor desperdiçado por ano (estimado)	8.836,73	R\$

Fonte: Autor.

A automatização das válvulas de fundo será realizada pelos técnicos de manutenção da própria empresa (Apolichs do Sul). Foram cotados atuadores pneumáticos (com as respectivas válvulas pneumáticas de controle) para as válvulas de esfera atuais e para o controle será utilizado um CLP da WEG modelo Click 02, sendo que este já se encontra disponível na empresa (retirado de uma máquina fora de uso). O custo dos atuadores e respectivos controladores ficou em R\$ 4.210,00, conforme orçamento da empresa Rede Tubulações e Conexões Ltda. (Anexo F), sendo estimado um custo total de execução de R\$ 5.500,00 incluindo mão de obra e

outros materiais necessários à instalação, como fiação elétrica e mangueiras de ar comprimido.

Com esses valores e utilizando a Equação (3), determinou-se o tempo de retorno do investimento a seguir (valores válidos para o ano de 2017):

$$Payback_{simples} = \frac{5500}{8836,73} = 0,62 \text{ anos}$$

O tempo de retorno é consideravelmente baixo, 7,5 meses, e somado à facilidade e melhoria das condições de operação e de segurança (evita acidentes, como possíveis queimaduras aos operadores da caldeira), foi aprovado pela diretoria para realização imediata (não implementado até a presente data).

4.4 TUBULAÇÃO SEM ISOLAMENTO TÉRMICO

Analisando a tubulação de distribuição de vapor, verificou-se que um trecho da mesma, de diâmetro de 2 polegadas estava sem isolamento térmico por um trecho de 25,0 metros. Segundo o gerente de manutenção da empresa, o trecho passou por uma reforma devido a vazamentos em janeiro de 2015, não tendo mais recebido o isolamento adequado. A Figura 4 apresenta o trecho da tubulação em questão.

Figura 4 - Trecho de tubulação de vapor sem isolamento térmico



Fonte: Autor.

Além da falta de isolamento, o trecho possui dois flanges com vazamentos na conexão flange-tubo. Será considerada apenas a perda de calor pela tubulação não isolada, pois o vazamento de vapor foi simplesmente resolvido com o aperto dos parafusos dos flanges, e segundo informações dos operadores da caldeira, o mesmo havia surgido na semana anterior ao estudo.

A Tabela 8 apresenta os dados de temperatura da tubulação e demais dados necessários para o cálculo da perda de calor total, apresentada nessa mesma tabela.

Tabela 8 - Dados de temperatura da tubulação e perda de calor pela tubulação sem isolamento térmico

Variáveis	Valores	Unidade
Diâmetro	2,0	in
Comprimento	25,0	m
Temperatura média	152,2	°C
Temperatura considerada, tubulação	150,0	°C
Temperatura ambiente considerada	20,0	°C
Diferença de temperatura para cálculo	130,0	°C
Emissão de calor (valor interpolado da Tabela 1)	412,6	kcal.h/m
	16,0	h/dia
Utilização da tubulação	22,0	dias/mês
	12,0	meses/ano
Perda total de calor	43.567.392,0	kcal/ano

Fonte: Autor.

Convertendo o calor possível de ser economizado para a quantidade de lenha necessária para gerar o mesmo calor consegue-se estimar o valor, em reais, desperdiçado por ano. A partir do orçamento do isolamento térmico para o trecho (Anexo F) é efetuado o cálculo de payback simples de acordo com a Equação (3). As considerações e resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Considerações e resultado do desperdício anual, em reais, pelo trecho de tubulação considerado

Variáveis	Valores	Unidade
PCI da lenha a 30% de umidade	2.926,8	kcal/kg
Massa da lenha a 30% de umidade	404,5	kg/st
Rendimento da caldeira, lenha	0,84	-

(continua)

Tabela 9 - Considerações e resultado do desperdício anual, em reais, pelo trecho de tubulação considerado

Variáveis	Valores	(conclusão)
		Unidade
Preço da lenha	70,0	R\$/st
Valor desperdiçado	3.066,68	R\$/ano
Custo isolamento, metro (Ver Anexo F)	98,50	R\$/m
Custo isolamento, 25 metros	2.462,50	R\$
Payback Simples (conforme Equação 3)	0,8	Anos

Fonte: Autor.

O desperdício anual através do trecho de 25,0 metros de 2" não isolado representa R\$ 3.066,68 (valores válidos para o ano de 2017). O custo total para o isolamento, incluindo calhas de lã de vidro, alumínio corrugado e demais componentes é de R\$ 2.462,50, resultando num payback de aproximadamente 9,6 meses, tempo consideravelmente curto. Esse resultado foi apresentado à empresa e foi aprovado para realização imediata (não concluído até a data do presente trabalho).

4.5 CONSUMO DE BIOMASSA E UMIDADE DO COMBUSTÍVEL

A lenha utilizada na caldeira é obtida de fornecedores da região, sendo constituída de diversas espécies de eucaliptos. A lenha é armazenada ao ar livre, conforme pode ser visto na Figura 5, sem proteção contra as intempéries. Os invernos da região geralmente são chuvosos, umedecendo o combustível e diminuindo o poder calorífico, conforme pode ser observado na Tabela 2.

Para determinar o consumo de combustível pela caldeira, foi tomado como base a média de lenha utilizada durante a semana. Os operadores foram orientados a manter um controle do número de paletes de lenha utilizados durante uma semana de operação da caldeira. O consumo diário médio para lenha em toras informado foi de 4,0 paletes totalizando 9,24 st/dia.

Para estimar a economia energética e econômica que pode ser obtida com o armazenamento adequado da lenha, foi realizada a comparação entre o consumo de lenha úmida utilizada atualmente na caldeira (teor de 40% de umidade) e o consumo teórico para uma lenha com teor de 20% de umidade, que poderia ser obtida a partir do armazenamento adequado da lenha, num local protegido das intempéries. As

considerações e cálculos são apresentados na Tabela 10, e foram efetuados no Microsoft Excel.

Figura 5 - Lenha armazenada ao ar livre, sem proteção contra as intempéries



Fonte: Autor.

Tabela 10 - Considerações e cálculos da economia possível com redução da umidade da lenha

Variáveis	Valores	Unidades
Valor lenha	70,00	R\$/st
Consumo diário, lenha em toras	9,24	st/dia
Dias utilização, mês	22,0	dias/mês
Meses utilização, ano	12,0	meses/ano
Consumo anual, lenha 40% de umidade	2.439,4	st/ano
Umidade da lenha utilizada (considerado)	40,0	%
PCI lenha 20% umidade	3.430,7	kcal/kg
PCI lenha 40% umidade	2.423,0	kcal/kg
Massa lenha 20% umidade	353,93	kg/st
Massa lenha 40% umidade	471,86	kg/st
Energia lenha 20% umidade	1,214	Gcal/st
Energia lenha 40% umidade	1,143	Gcal/st
Relação energia lenha 20%/40%, em função da umidade	1,062	-
Consumo anual, lenha 20% umidade	2.296,9	st/ano
Redução de consumo anual	142,4	st/ano
Redução de consumo	9.969,83	R\$

Fonte: Autor.

Conforme os cálculos apresentados, a utilização de lenha com teor de umidade de 20%, em relação à lenha utilizada, com teor de 40% de umidade, representa uma economia para a empresa de R\$ 9.969,83 anuais (valores válidos para o ano de 2017). Esse valor é considerável, porém como a utilização de cavaco é mais vantajosa, a única medida indicada até o término do consumo da lenha armazenada é efetuar a cobertura do estoque de lenha com lonas impermeáveis que a empresa já possui, não representando nenhum custo adicional.

4.6 SUBSTITUIÇÃO DO GLP POR VAPOR

Uma das estufas de secagem de peças metálicas apresenta aquecimento com Gás Liquefeito de Petróleo – GLP. O mesmo é comprado a granel da empresa distribuidora, sendo armazenado em reservatório adequado. O consumo médio mensal de gás por esse equipamento, segundo dados fornecidos pela empresa, é de 700,0 kg, ao custo médio no período considerado de 2,25 R\$/kg. O PCI do GLP considerado é de 11.200 kcal/kg, e pode ser visto na tabela do Anexo G.

Como não foi possível obter os dados de eficiência da queima para o queimador que equipa a estufa de secagem, será considerado para efeito de cálculo que todo o calor fornecido pelo combustível é transferido para o ar da estufa, ou seja, rendimento teórico de 100%. Essa simplificação pode ser adotada, pois o rendimento real sempre é menor que 100%, elevando os gastos com GLP, o que valida o cálculo de payback.

Para os dados acima consegue-se quantificar o valor do GLP por Gcal útil. Os dados e considerações podem ser visualizados na Tabela 11:

Tabela 11 – Dados considerados para o cálculo de viabilidade de substituição do GLP por vapor d'água saturado

(continua)

Variáveis	Valores	Unidade
Valor do GLP	2,25	R\$/kg
PCI do GLP	11.200,0	kcal/kg
Eficiência do queimador de gás, considerado	1,0	-
Custo do Gcal do aquecimento estufa, com GLP	201,07	R\$/Gcal
Rendimento de um trocador de calor vapor d'água/ar (Nogueira, 2005b)	0,90	-
Custo do Gcal, cavaco	52,79	R\$/Gcal

Tabela 11 – Dados considerados para o cálculo de viabilidade de substituição do GLP por vapor d’água saturado

(conclusão)

Variáveis	Valores	Unidade
Custo do Gcal do aquecimento estufa, com vapor d’água (utilização de cavaco)	58,66	R\$/Gcal
Consumo médio mensal de GLP	3.965,66	R\$
Consumo anual de GLP	47.587,92	R\$
Relação custo vapor saturado/GLP	0,292	%
Consumo anual estimado, com vapor d’água	13.882,10	R\$
Economia anual	33.705,81	R\$
Custo estimado de um trocador de calor vapor/ar, tubulação e acessórios	15.000,00	R\$
Payback	0,445	Anos

Fonte: Autor.

Foi realizada uma estimativa de custo para um trocador de calor tipo compacto com utilização de vapor d’água saturado – junto à empresa MTI - MONTAGENS TÉCNICAS INDUSTRIAIS LTDA – e, para suprir a demanda de calor atualmente gerada pelo aquecedor a gás, foi indicado um trocador de calor com dimensões de 400 x 400 x 600 mm, ao custo aproximado de R\$ 9.000,00. Estimando os demais componentes necessários para a montagem (tubos de vapor, isolamento térmico, válvulas de controle, purgadores e mão de obra) em R\$ 6.000, o custo total ficaria em R\$ 15.000. O cálculo de Payback, conforme Equação (3), resultou num retorno de investimento de pouco mais de 5,0 meses, viabilizando plenamente o investimento (valores válidos para o ano de 2017).

Os resultados da análise foram apresentados à empresa que, de posse da análise de viabilidade, solicitou de imediato que a empresa fornecedora de trocadores de calor realizasse uma visita técnica para o dimensionamento e orçamento do sistema de aquecimento por vapor d’água saturado.

4.7 RESUMO DAS MEDIDAS DE MELHORIA

A Tabela 12 a seguir apresenta as melhorias propostas, o investimento necessário para a implementação, o tempo de retorno do investimento e possíveis ganhos qualitativos na operação do sistema de vapor.

Tabela 12 - Resumo das medidas de melhoria

Melhoria	Investimento inicial (R\$)	Tempo de retorno	Ganhos Quantitativos/Qualitativos
Utilização de cavaco	-	-	- Melhoria no processo; - Economia anual de R\$ 42.692,88
Automatização das descargas de fundo	5.500,00	7,5 meses	- Melhoria no processo; - Melhor controle da qualidade da água; - Economia anual de R\$ 8.836,73
Isolamento térmico do trecho da tubulação de 2 in, 25 m	2.462,50	9,6 meses	- Economia anual de R\$ 3.066,68
Redução da umidade da lenha de 40% para 20%	-	-	- Economia anual de R\$ 9.969,83
Substituição do aquecimento da estufa, GLP por vapor	15.000,00 (estimado)	5,0 meses	- Economia anual de 33.705,81

Fonte: Autor.

5. CONCLUSÃO

O desenvolvimento do trabalho demonstrou a importância da análise de um sistema de geração e distribuição de vapor sob a ótica da eficiência energética. A utilização dessa ferramenta na empresa Apolichs do Sul permitiu a determinação dos pontos que podem gerar melhorias no desempenho energético do sistema, sejam dependentes de mudanças nos procedimentos operacionais ou de investimentos em novos equipamentos.

A utilização de cavaco, quando comparada à utilização de lenha em toras, mostrou-se economicamente mais viável, apresentando-se 25,0 % mais econômica. O aproveitamento do combustível pode ser melhorado também com a diminuição do teor de umidade, sendo que a diminuição de 20,0% representa a economia anual de R\$ 9.969,83 (valores válidos para o ano de 2017), considerando-se lenha em toras como combustível. Como o cavaco é mais vantajoso, e como a empresa já possui local coberto para o mesmo, não foi realizado o orçamento para a construção de um possível galpão para a cobertura da lenha. O estoque de lenha atual será totalmente consumido e, a partir de então, somente cavaco será utilizado, sendo que a umidade do mesmo também será controlada, exigindo do fornecedor umidades abaixo de 30,0%.

Em relação às descargas de fundo, o investimento na automatização do sistema teria retorno em 11,0 meses, período consideravelmente rápido. Além do benefício de menor consumo energético, a automatização traz ganhos operacionais e de segurança. A qualidade da água de alimentação da caldeira é mais facilmente mantida dentro dos parâmetros indicados, o que evita possíveis corrosões do equipamento e danos econômicos, relacionados à manutenção. Quanto à falta de isolamento térmico, demonstrou-se que o retorno do investimento do isolamento será de 10,0 meses. As duas situações apresentadas, por apresentarem um rápido retorno do investimento, foram aprovadas para implementação pela diretoria da empresa, porém ainda não tinham sido realizadas até a presente data.

O vapor produzido na empresa ainda pode ser utilizado de modo econômico na substituição do aquecimento de um dos equipamentos que atualmente utiliza GLP. O retorno para tal investimento, considerando a diferença com o valor de combustível anual *versus* a instalação do equipamento para utilização de vapor, é de 5,0 meses. Nesse caso podem-se citar também como outros ganhos a melhor

utilização do potencial da caldeira e a maior segurança utilizando-se vapor quando comparado à utilização de GLP.

Para trabalhos futuros sugere-se a medição da eficiência da caldeira com a utilização de equipamentos adequados. A análise dos gases é de suma importância, adequando a queima para a obtenção da máxima eficiência energética. Outro ponto de estudo é a automatização, por meio de inversores de frequência, dos dois motores do sistema de tiragem, um de 15,0 cv e outro de 7,5 cv. Atualmente eles operam, ou ficam ligados, durante todo o período de funcionamento da caldeira, sendo que o sistema de tiragem é controlado pelo fechamento dos *dampers*. Com a utilização de inversores, a velocidade desses motores seria controlada, diminuindo o consumo energético e o desgaste mecânico dos motores e equipamentos acoplados. Os resultados obtidos com as melhorias sugeridas nesse trabalho também deverão ser analisados.

Por fim a realização do trabalho demonstrou a aplicabilidade da análise energética, não importando o tamanho da indústria ou o tipo de energia considerada. Qualquer processo que utilize energia é passível de efficientização, quer seja na parte de projeto ou de melhoria e mudança nos procedimentos operacionais. Os investimentos em eficiência sempre devem ser justificados por análises econômicas, viabilizando as decisões de implementação imediata dos mesmos por parte das empresas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, W. **Eficiência energética de um gerador de vapor através do método indireto**. Francisco Beltrão: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014. Disponível em: <e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/download/12176/8451>. Acesso em: 12 abril 2017.
- ALTAFINI, C. R. **Apostila sobre caldeiras**. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2002.
- BAZZO, E. **Geração de vapor**. Santa Catarina: Editora da UFSC, 1992.
- BIZZO, W. A. **Geração, distribuição e utilização de vapor**. Apostila de curso. Campinas: FEM/Unicamp, 2003.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. 2ª ed. rev. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- CAVACOS Brasil. **Tabela Cavaco de Madeira**. Disponível em: <<http://www.cavacosbrasil.com.br/servicos.php>>. Acesso em: 17 mai 2017.
- DA SILVA, A. C. C. **Conservação e gerenciamento de energia em sistemas de vapor**. Trabalho de conclusão de curso de graduação. Campo Mourão: UTFPR, 2013. Disponível em <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/972/1/CM_COEAL_2012_2_03.pdf>. Acesso em: 04 abril 2017.
- DOS REIS, L. B.; DA CUNHA, E. C. N. **Energia elétrica e sustentabilidade: aspectos tecnológicos, socioambientais e legais**. Barueri, SP: Manole, 2006.
- MARTINELLI JR, L. C. **Geradores de vapor**. UNIJU: Campus Panambi, 2002. Disponível em <<http://www.saudeetrabalho.com.br/download/gera-vapor.pdf>>. Acesso em: 26 mai 2017.
- NASCIMENTO, M. D. **Otimização do uso de lenha e cavaco de madeira para produção de energia em agroindústria seropédica**. Botucatu, UNESP, 2007. Disponível em: <<http://www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq0223.pdf>>. Acesso em: 30 mar 2017.
- NOGUEIRA, L. A. H. **Eficiência Energética no Uso de Vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005a. Disponível em: <<https://static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/uploads/arquivos/LivroVapor.pdf>>. Acesso em: 01 mai 2017.
- _____. **Eficiência Energética no Uso de Vapor – Manual Prático**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005b. Disponível em: <<https://proframonsilva.files.wordpress.com/2013/12/manual-vapor.pdf>>. Acesso em: 01 mai 2017.
- ONOFRE, R. de M. **Como otimizar o uso do condensado**. Mecatrônica Atual, São Paulo, n. 26, p. 11-15, 2006.

_____. **O uso sensato do calor latente.** Mecatrônica Atual, São Paulo, n. 20, p. 52-54, 2005.

PERA, H. **Geradores de vapor: um compêndio sobre a conversão de energia com vistas à preservação da ecologia.** São Paulo: Fama, 1990.

SALUM, A. D. **Eficiência Energética em Sistema de Combustão de Caldeira.** Salvador, Universidade Federal da Bahia, 2011. Disponível em: <<http://www.pei.ufba.br/novo/uploads/biblioteca/TFC%20-%20ANDERSON%20DOURADO%20SALUM.pdf>>. Acesso em: 05 mai 2017.

SPIRAX SARCO. **The Steam and Condensate Loop.** England: Spirax-Sarco Limited, 2007.

_____. **Steam Engineering Tutorials.** Disponível em: <<http://www.spiraxsarco.com/Resources/Pages/steam-engineering-tutorials.aspx>>. Acesso em: 24 abril 2017.

_____. Curso de Projeto de Sistemas de Vapor. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/marcosromanholo7/parte-02-gerao-de-vapor>>. Acesso em: 29 mai 2017.

TELLES, P. S. **Tubulações Industriais: Materiais, projeto e montagem.** 10^a ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2001.

_____. **Tubulações Industriais: Cálculo.** 9^a ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1999.

TORREIRA, R. P. **Fluidos térmicos: água, vapor, óleos térmicos.** São Paulo: Hemus S.A., 2002.

TLV, Uma Empresa Especializada em Vapor. **Teoria do Vapor.** Disponível em: < <http://www.tlv.com/global/BR/steam-theory/> >. Acesso em: 24 abril 2017.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C.. **Fundamentos da termodinâmica.** São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

VPH Sistemas de Fluxo. **Tabela de Vapor Saturado.** Disponível em: <http://www.vph.com.br/PDF/vapor.pdf>. Acesso em: 04 mai 2017.

APÊNDICE A – CONSIDERAÇÕES PARA OS CÁLCULOS DAS TABELAS 4 E 5

São apresentadas aqui as considerações realizadas para os cálculos e desenvolvimento das tabelas.

- **Tabela 4:**

Utilizando a Equação (2) é calculada a massa seca da madeira considerada:

$$40 = \frac{100 * [471,9 - \text{Massa seca}]}{471,9}$$

$$\text{Massa seca lenha} = 283,14 \text{ kg}$$

A partir de então o termo massa seca é substituído pelo valor acima (283,14) na equação. Fixando o valor de umidade desejado, é obtida a massa total correspondente.

- **Tabela 5:**

Variáveis	Valores	Unidades	Resolução
Combustível, umidade de 30%	Lenha de Eucalipto	Cavaco de Eucalipto	Tipos de Combustível
Custo (R\$/st)	70,00	35,00	Valor pago pelo combustível, em 2017
Densidade (Kg/st)	404,5	300,0	Densidade, Tabelas 3 e 4
PCI (Kcal/Kg)	2926,8	2600,0	PCI do combustível, Tabelas 2 e 3
Rendimento da caldeira (%)	84,0	85,0	Dados do fabricante, Anexo D
PCI (Gcal/st)	1,18	0,78	(PCI x Densidade)/1000000
Custo (R\$/Gcal)	70,4	52,79	Custo (R\$/st)/PCI (Gcal/st)
Relação custo cavaco/lenha (-)	0,75	-	Custo cavaco/Custo Lenha
Consumo mensal aproximado (st)	203,28	-	Dados coletados, Anexo B
Valor mensal, lenha em toras (R\$)	14229,60	R\$	Consumo mensal x Custo (R\$/st)
Valor mensal, cavaco (R\$)	10671,86	R\$	Valor mensal lenha em toras x Relação cavaco/lenha (-)
Economia mensal com utilização de cavaco (R\$)	3557,74	R\$	Valor mensal lenha em toras - Valor mensal, cavaco

APÊNDICE B – CONSIDERAÇÕES PARA OS CÁLCULOS DA TABELA 7

- **Tabela 7:**

Variáveis	Valores	Unidades	Resolução
Válvulas de 2"	4,0	Unidades	Quantidade de válvulas na caldeira
Válvulas de 1"	1,0	Unidades	Quantidade de válvulas na caldeira
Pressão considerada	0,69	MPa	Pressão de operação da caldeira
Vazão válvula de 2" à pressão considerada	8,0	l/s	Vazão da válvula, Tabela 6
Vazão válvula de 1" à pressão considerada	2,7	l/s	Vazão da válvula, Tabela 6
Número de acionamentos manuais por válvula	1,0	Acionament o/h	Acionamentos das válvulas, observados na operação da caldeira
Tempo médio de abertura, acionamento manual	10,0	Segundos	Tempo médio de abertura, cronometrado
Número de acionamentos automatizados por válvula	1,0	Acionament o/h	Acionamentos necessários, recomendação do fabricante
Tempo médio de abertura, acionamento automatizado	5,0	Segundos	Tempo médio de abertura, recomendado
Diferença entre os tempos de abertura (base para o cálculo de desperdício)	5,0	Segundos	Tempo descarga manual - Tempo descarga automatizada
Tempo de operação da caldeira, considerando 16 horas diárias, 22 dias úteis/mês e 12 meses/ano	4224,0	Horas	Tempo operação caldeira
Número de acionamentos por válvula	4224,0	Acionament os válvula/ano	Número de acionamento válvula x Tempo de operação ano
Calor sensível da água, à pressão de 0,69 MPa	171,3	Kcal/Kg	Tabela Anexo B
Volume anual das descargas de fundo, total (descarga automatizada)	732864,0	l/ano	Número de acionamentos válvulas ano x ((Vazão válvulas 2" x Diferença Tempo de Abertura x Qt válvulas) + (Vazão válvula 1" x Diferença Tempo de abertura x Qt válvulas))
Volume anual das descargas de fundo desperdiçados com descarga manual	732864,0	l/ano	Volume Descarga maual - Volume Descarga automatizada
Calor desperdiçado anualmente através das descargas de fundo	125,54	Gcal/ano	Calor sensível da água a 0,69 MPa x Volume anual desperdiçado
Custo Gcal, combustível lenha	70,39	R\$/Gcal	Tabela 5
Valor desperdiçado por ano	R\$ 8.836,73	R\$	Calor desperdiçado x Custo Gcal, combustível lenha

APÊNDICE C – CONSIDERAÇÕES PARA OS CÁLCULOS DAS TABELAS 8 E 9

- **Tabela 8:**

Variáveis	Valores	Unidade	Resolução
Diâmetro	2,0	in	Diâmetro da tubulação
Comprimento	25,0	m	Comprimento da tubulação sem isolamento
Temperatura média	152,2	°C	Temperatura média obtida, medições
Temperatura considerada, tubulação	150,0	°C	Temperatura média considerada para cálculo
Temperatura ambiente considerada	20,0	°C	Temperatura ambiente considerada
Diferença de temperatura para cálculo	130,0	°C	Temperatura considerada - Temperatura ambiente
Emissão de calor, valor interpolado da Tabela 1	412,57	Kcal.h/m	Valor obtido da Tabela 1
Utilização da tubulação	16,0	h/dia	Tempo de Utilização da tubulação
	22,0	dias/mês	
	12,0	meses/ano	
Perda total de calor	43567392,0	Kcal/ano	Tempo de utilização anual x Comprimento da tubulação x Emissão de calor

- **Tabela 9:**

Variáveis	Valores	Unidade	Resolução
PCI da lenha a 30% de umidade	2926,8	Kcal/Kg	Tabelado, Tabela 2
Massa da lenha a 30% de umidade	404,5	kg/st	Tabelado, Tabela 4
Rendimento da caldeira, lenha	0,84	-	Dados do fabricante, Anexo D
Preço da lenha	70,0	R\$/st	Valor pago pelo combustível, em 2017
Valor desperdiçado	R\$ 3.066,68	R\$/ano	(Perda total de calor/PCI x Massa da lenha x Rendimento) x Preço da lenha
Custo isolamento, metro	98,50	R\$/m	Orçamento, Anexo F
Custo isolamento, 25 metros	2462,50	R\$	Comprimento da Tubulação x Custo isolamento
Payback	R\$ 0,803	anos	Valor desperdiçado/Custo Isolamento

APÊNDICE D – CONSIDERAÇÕES PARA OS CÁLCULOS DA TABELA 10

- Tabela 10:

Variáveis	Valores	Unidades	Resolução
Valor lenha	70,00	R\$/st	Valor considerado, dados da empresa
Consumo diário, lenha em toras	9,24	st/dia	Valor considerado, dados coletados, Anexo B
Dias utilização, mês	22,0	dias/mês	Dias de utilização, dados da empresa
Meses utilização, ano	12,0	meses/an	Meses de utilização, dados da empresa
Consumo anual, lenha 40% de umidade	2439,4	st/ano	Consumo Diário x Dias utilização x Meses utilização
Umidade da lenha utilizada (considerado)	40,0	%	Umidade considerada
PCI lenha 20% umidade	3430,7	Kcal/kg	Tabelado, Tabela 3
PCI lenha 40% umidade	2423,0	Kcal/kg	Tabelado, Tabela 3
Massa lenha 20% umidade	353,93	Kg/st	Tabelado, Tabela 4
Massa lenha 40% umidade	471,86	Kg/st	Tabelado, Tabela 4
Energia lenha 20% umidade	1,214	Gcal/st	PCI lenha 20% x Massa Lenha 20%
Energia lenha 40% umidade	1,143	Gcal/st	PCI lenha 40% x Massa Lenha 40%
Relação energia lenha 20%/40%, em função da umidade	1,062	-	Energia lenha 20%/Energia lenha 40%
Consumo anual, lenha 20% umidade	2296,9	st/ano	Consumo anual, lenha 40%/Relação energia 20%/40%
Redução de consumo anual	142,4	st/ano	Consumo anual, lenha 40% - Consumo anual, lenha 20%
Redução de consumo	R\$ 9.969,83	R\$	Redução consumo x Valor lenha

APÊNDICE E – CONSIDERAÇÕES PARA OS CÁLCULOS DA TABELA 11

- **Tabela 11:**

Variáveis	Valores	Unidade	Resolução
Valor do GLP	2,252	R\$/Kg	Valor pago pelo combustível, em 2017
PCI do GLP	11200,0	Kcal/Kg	Tabelado, Anexo G
Eficiência do queimador de gás	1,000	-	Eficiência adotada para o cálculo (máxima, para não superestimar a economia com a utilização de vapor)
Custo do Gcal do aquecimento, com gás	201,07	R\$/Gcal	$\text{Valor do GLP} / ((\text{PCI do GLP} / 1000000) \times \text{Eficiência do Queimador})$
Rendimento de um trocador de calor, com retorno de condensado	0,90	-	Valor obtido no livro Eficiência Energética no Uso de Vapor – Manual Prático
Custo do Gcal, cavaco	52,790	R\$/Gcal	Tabelado, Tabela 5
Custo do Gcal do aquecimento, com vapor (utilização de cavaco)	58,66	R\$/Gcal	Custo do Gcal cavaco x Rendimento de trocador de calor com retorno de condensado (utilização de vapor saturado)
Consumo médio mensal de GLP	3965,660	R\$	Valor gasto mensalmente pela empresa, média do consumo
Consumo anual de GLP	47587,92	R\$	Valor mensal x 12 (período de utilização anual)
Relação custo vapor/GLP	0,292	-	Custo Gcal vapor/Custo Gcal GLP
Consumo anual estimado, com vapor d'água	13882,11	R\$	Consumo anual GLP x Relação custo vapor/GLP
Economia anual	33705,809	R\$	Consumo anual de GLP - Consumo anual com vapor saturado
Custo estimado de um trocador de calor vapor/ar, tubulação e acessórios	15000,00	RS	Orçamento estimado para os itens, realizado junto à empresa MTI
Payback	0,445	Anos	Economia anual/Custo trocador de calor

ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES MEDIDOR DE UMIDADE MINIPA MWD – 14A



PROPOSTA TÉCNICA

MEDIDOR DE UMIDADE DE MADEIRA

MODELO: MWD-14A

CARACTERÍSTICAS

- Display: LCD.
- Indicação de Bateria Fraca:
- Data Hold
- Tampa Protetora do Sensor.
- Ambiente de Operação: 0°C ~ 40°C (32°F~104°F), RH < 70%.
- Alimentação: 1 Bateria 9V.
- Dimensões: 129(A) x 63(L) x 32(P)mm.
- Peso: Aprox. 116g (bateria inclusa).



APLICAÇÕES

É um instrumento robusto dotado de um grande display digital de fácil visualização, funções de congelamento de leitura e indicação de bateria fraca. Pode ser utilizado para a medida de umidade em madeira, bambu, algodão, tabaco, e muitos outros.

GERAL

A precisão é específica como $\pm(\% \text{ leitura} + \text{número de dígitos})$ para temperatura $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa < 70%. A especificação é válida para 5% a 100% da faixa de medida. Ciclo de calibração recomendado de 1 ano.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

- Faixa de Operação: 5% ~ 40%.
- Precisão: $\pm 1\%$
- Resolução: 1%

ACESSÓRIOS

1. Manual de Instruções (1 peça).
2. Estojo para Transporte (1 peça).
3. Bateria 9V (1 peça, instalada).



Especificações sujeitas a alterações sem prévio aviso. Figuras meramente ilustrativas.

MINIPA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA TELEFONE: +55-11-5078-1850 FAX: +55-11-5071-2679
Alameda dos Tupinás, nº 33 - Planalto Paulista - São Paulo - SP - CEP: 04063-000
Visite nosso site: <http://www.minipa.com.br>

MWD-14A PG I/I

ANEXO C – ESPECIFICAÇÕES TERMÔMETRO INFRAVERMELHO MT-320


MT-320

TERMÔMETRO INFRAVERMELHO

Infrared Thermometer / Termómetro Infrarrojo

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS / Technical Specifications / Especificaciones Técnicas

FUNÇÕES & CARACTERÍSTICAS / FUNCTIONS & FEATURES / FUNCIONES & CARACTERÍSTICAS

Faixa de Temperatura / Temperature Range / Rango de Temperatura: -20°C ~ 400°C / -4°F ~ 752°F

Resolução do Display / Display Resolution / Resolución de la Pantalla: 0,1°C / 0,1°F

Precisão / Precision / Precisión: ± (2% leitura ou ±2°C)

Emissividade Ajustável / Adjustable Emissivity / Emissividad Ajustable: 0,10 à 1,0

*Sujeto a alterações sem aviso prévio. Subject to change without prior notice. Sujeto a alteraciones sin aviso previo.

<p>Conteúdo</p> <ul style="list-style-type: none"> Manual de Instruções Bateria 9V 6F22 	<p>Contents</p> <ul style="list-style-type: none"> Instructions Manual 9V 6F22 Battery 	<p>Contiene</p> <ul style="list-style-type: none"> Manual de Instrucciones Batería 9V 6F22
--	---	---

<p>Importado por: Minipa do Brasil Ltda. Av. Carlos Liviero, 59 - Vila Liviero 04186-100 - São Paulo/SP - Brasil CNPJ 10.719.113/0001-03 I.E. 148.542.462.117</p>	<p>Importado por: Minipa do Brasil Ltda. Rua Dna. Francisca, 8300 - Bl. 4 - Mod. A 89219-600 - Joinville/SC - Brasil CNPJ 10.719.113/0002-86 I.E. 26.896.579-3</p>	<p>Imported by: Minipa Electronics USA Inc. 10899 - Kinghurst # 220 Houston - Texas - 77099 - USA</p>
---	--	---

 <p>MINIPA ONLINE Dúvidas? Consulte: www.minipa.com.br Acesse Fórum Sua resposta em 24 horas</p>	 <p>MINIPA ONLINE ¿Dudas? Consulte: www.minipa.com.br Entre en Nuestro Foro Su Respuesta en 24 horas</p>	  <p>@minipabrasil @minipabrasil</p> <p>Made in China</p>  <p>7 898112 606080</p>
---	---	--

Fonte: Minipa. Especificações do equipamento contidas na embalagem.

ANEXO D – INFORMAÇÕES DE RENDIMENTO DA CALDEIRA

INFORMAÇÕES DE RENDIMENTO – CALDEIRA SECAMAQ

Fabricante: SCH Máquinas e Equipamentos LTDA

Modelo: SCHM – 2.5

Data de Fabricação: 10/2012

Pré-aquecedor de ar: Sim

Retorno de condensado: Sim

Tiragem: Forçada

Indução de ar: Forçada

Pressão de Operação: 10,0 Kgf/cm²

Produção de vapor: 2500 Kgv/h

Rendimentos teóricos, poderão variar de acordo com as condições climáticas do local de instalação, umidade do combustível e condições de operação:

- Lenha em toras: 84,0 ± 1,5 %
- Cavaco: 85,0 ± 1,5 %



DANIEL JUNIOR JANNING
 ENGENHEIRO MECÂNICO
 CREA/SC 123888-3
 SCH MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS LTDA
 RESPONSÁVEL TÉCNICO



Daniel Junior Janning

Engenheiro Mecânico - Engenharia e Projeto - Engineering and Projects
 CREA-SC: 123888-3

Sch Máquinas e Equipamentos Ltda.
 CNPJ: 03.491.678/0001-02
 EXCELÊNCIA EM GERAÇÃO DE VAPOR E ENERGIA

47.3563 0306
 47.3563 1263

ANEXO E – TABELA DE VAPOR D'ÁGUA SATURADO

1	2	3	4	5	6	7
Pressão Relativa	Pressão Aboluta	Temperatura	VOLUME Específico	Calor Sensível	Calor Total	Calor Latente
bar	bar	°C	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg
	0,01	6,7	131,7	6,7	600,1	593,0
	0,015	12,7	89,64	12,8	602,8	590,0
	0,02	17,2	68,27	17,2	604,8	587,4
	0,025	20,8	55,28	20,8	606,4	585,6
	0,03	23,8	46,53	23,8	607,7	583,9
	0,04	28,6	35,46	28,6	609,8	581,1
	0,05	32,5	28,73	32,5	611,5	578,9
	0,06	35,8	24,19	35,8	612,9	577,1
	0,08	41,2	18,45	41,1	615,12	574,1
	0,10	45,4	14,95	45,4	617,0	571,6
	0,12	49,1	12,60	49,0	618,5	569,5
	0,15	53,6	10,21	53,5	620,5	567,0
	0,20	59,7	7,795	59,6	623,1	563,5
	0,25	64,6	6,322	64,5	625,1	560,6
	0,30	68,7	5,328	68,6	626,8	558,2
	0,35	72,2	4,614	72,2	628,2	556,0
	0,40	75,4	4,069	75,4	629,5	554,1
	0,50	80,9	3,301	80,8	631,6	550,8
	0,60	85,5	2,783	85,4	633,4	548,0
	0,70	89,5	2,409	89,4	634,9	545,5
	0,80	92,9	2,125	92,9	636,2	543,2
	0,90	96,2	1,904	96,2	637,4	541,2
0	1,0	99,1	1,725	99,1	638,5	539,4
0,1	1,1	101,8	1,578	101,8	639,4	537,6
0,2	1,2	104,2	1,455	104,3	640,3	536,0
0,3	1,3	106,6	1,350	106,7	641,2	534,5
0,4	1,4	108,7	1,259	108,9	642,0	533,1
0,5	1,5	110,8	1,180	110,9	642,8	531,9
0,6	1,6	112,7	1,111	112,9	643,5	530,6
0,8	1,8	116,3	0,995	116,5	644,7	528,2
1,0	2,0	119,6	0,902	119,9	645,8	525,9
1,2	2,2	122,6	0,826	123,0	646,9	524,0
1,4	2,4	125,5	0,7616	125,8	648,0	522,1
1,6	2,6	128,1	0,7066	128,5	649,1	520,4
1,8	2,8	130,5	0,6592	131,0	650,2	518,7
2,0	3,0	132,9	0,6166	133,4	650,3	516,9
2,2	3,2	135,1	0,5817	135,7	651,0	515,8
2,4	3,4	137,2	0,5495	137,8	651,7	514,3
2,6	3,6	139,2	0,5208	139,9	652,4	512,8
2,8	3,8	141,1	0,4951	141,8	653,1	511,3
3,0	4,0	142,9	0,4706	143,6	653,4	509,8
3,5	4,5	147,2	0,4224	148,1	654,6	506,7
4,0	5,0	151,1	0,3816	152,1	655,8	503,7
4,5	5,5	154,7	0,3497	155,9	656,8	501,2
5,0	6,0	158,1	0,3213	159,3	657,8	498,5
5,5	6,5	161,2	0,2987	162,7	658,6	496,1
6,0	7,0	164,2	0,2778	165,6	659,4	493,8
6,5	7,5	167,0	0,2609	168,7	660,1	491,6
7,0	8,0	169,6	0,2448	171,3	660,8	489,5
7,5	8,5	172,1	0,2317	174,0	661,4	487,5
8,0	9,0	174,5	0,2189	176,4	662,0	485,6
8,5	9,5	176,8	0,2085	179,0	662,5	483,7
9	10	179,0	0,1981	181,2	663,-0	481,8
10	11	183,2	0,1808	185,6	663,9	478,3
11	12	187,1	0,1664	189,7	664,7	475,0
12	13	190,7	0,1541	193,5	665,4	471,9
13	14	194,1	0,1435	197,1	666,0	468,9
14	15	197,4	0,1343	200,6	666,6	466,0

Fonte: VPH Sistemas de Fluxo, tabela de vapor d'água saturado. Disponível em: <http://www.vph.com.br/PDF/vapor.pdf>.

ANEXO F – ORÇAMENTO AUTOMATIZAÇÃO DESCARGAS DE FUNDO



REDE TUBULACOES E CONEXOES LTDA
CNPJ/CPF 18.686.660/0001-33 Insc. Estadual 1240297383
Endereço AV MAUA 1865 Bairro RIO DOS SINOS SÃO LEOPOLDO - RS

Bom dia, Segue cotação:

25	mt	De isolamento (calha, alumínio e demais materiais) para tubulação de 2";	R\$ 98,50	R\$ 2.462,50
4	pc	Atuadores pneumáticos e válvulas solenóides de controle, 220v, para válvula de esfera MGA 2", com conjunto de montagem na válvula;	R\$890,00	R\$ 3.560,00
1	pc	Atuador pneumático e válvula solenóide de controle, 220v, para válvula MGA 1", com conjunto de montagem na válvula	R\$650,00	R\$ 650,00
				R\$ 6.672,50

Fonte: Rede Tubulações e Conexões LTDA, 2017.

ANEXO G – PODER CALORÍFICO INFERIOR PARA VÁRIOS COMBUSTÍVEIS



COMBUSTÍVEL	Pci	COMBUSTÍVEL	Pci
Alcool de cana	5.500 kcal/l	Gás natural	9.000 kcal/m ³
Aparas vinilo	6.300 kcal/kg	Lascas de madeira	3.300 kcal/kg
Bagaço de cana (20% água)	3.200 kcal/kg	Lenha (40% água)	2.400 kcal/kg
Bagaço de cana (50% água)	1.800 kcal/kg	Lenha (seca) (12% água)	3.800 kcal/kg
Bambô (10% água)	3.700 kcal/kg	Madeira de caixotes	3.800 kcal/kg
Borra de café	1.570 kcal/kg	Madeira muito seca	4.800 kcal/kg
Carvão de babaú	7.000 kcal/kg	Madeira de pinho (seca ao ar)	3.500 kcal/kg
Carvão mineral-Cambul/PR	6.200 kcal/kg	Madeira verde	2.500 kcal/kg
Carvão mineral-Charqueadas/RS	3.100 kcal/kg	Óleo combustível 1A	9.550 kcal/kg
Carvão mineral-Mina do Leão/RS	4.200 kcal/kg	Óleo combustível 2A	9.431 kcal/kg
Carvão mineral-Tubarão/SC	4.500 kcal/kg	Óleo combustível 3A	9.388 kcal/kg
Carvão vegetal	7.500 kcal/kg	Óleo combustível 4A	9.291 kcal/kg
Casca árvore	2.200 kcal/kg	Óleo combustível 7A	9.290 kcal/kg
Casca algodão	3.000 kcal/kg	Óleo de algodão	8.050 kcal/l
Casca de amêndoa dendê	4.800 kcal/kg	Óleo de amendoim	8.000 kcal/l
Casca de arroz (12% água)	3.300 kcal/kg	Óleo de babaçu	7.770 kcal/l
Casca de babaçu	4.000 kcal/kg	Óleo de soja	8.125 kcal/l
Casca de cacau (8% água)	3.900 kcal/kg	Óleo diesel	8.466 kcal/l
Casca de café	3.800 kcal/kg	Palha de amendoim (12% água)	3.100 kcal/kg
Casca de caju	4.700 kcal/kg	Palha de trigo (20% água)	3.200 kcal/kg
Casca de côco	4.000 kcal/kg	Papel	4.200 kcal/kg
Casca de eucalipto	3.750 kcal/kg	Piche alcatrão	8.600 kcal/kg
Casca de tanino (68% água)	800 kcal/kg	Pó de linho	4.000 kcal/kg
Casa de soja	3.300 kcal/kg	Pó de madeira fino (seco)	4.000 kcal/kg
Cavaco (eucalipto)	4.300 kcal/kg	Pó de madeira grosso(seco)	4.200 kcal/kg
Cavacos de pinho	2.500 kcal/kg	Pó tabaco	2.300 kcal/kg
Coque de gás	5.400 kcal/kg	Querosene	8.300 kcal/l
Coque de lenha	7.600 kcal/kg	Recortes de couro (14% água)	4.400 kcal/kg
Coque metalúrgico	7.200 kcal/kg	Resíduos de juta	3.800 kcal/kg
Fibras de palmeira (48% água)	2.000 kcal/kg	Restos de borracha	4.000 kcal/kg
Fibras de palmito	3.800 kcal/kg	Sementes de girassol (9,5% água)	4.300 kcal/kg
Filme polietileno	5.600 kcal/kg	Serragem de pinho (40% água)	2.000 kcal/kg
Gás de água	4.000 kcal/m ³	Serragem seca (20% água)	3.500 kcal/kg
Gás de água carburado	6.000 kcal/m ³	Serragem + Cepilho (seco)	4.600 kcal/kg
Gás alto forno	700 kcal/m ³	Sisal (11% água)	3.400 kcal/kg
Gás de biodigestor (biogás)	5.000 kcal/m ³	Sobra de serraria (pinho)	4.160 kcal/kg
Gás de coqueira	4.300 kcal/m ³	Tecido nailon	7.300 kcal/kg
Gás de gasogênio	1.260 kcal/m ³	Trapos de pano	4.200 kcal/kg
Gás de nafta	4.750 kcal/m ³	Turfa (seca ao ar 25 a 6% água)	3000-5000 kcal/kg
Gás GLP (50%)	11.200 kcal/kg		

Av. Frederico Ritter, 3150 | CEP 94930 000 | Cachoeirinha RS Brasil
Fone +55 (51) 3406 6979 | Fax +55 (51) 3406 6903

www.arauterm.com.br

ARAUTERM
EXCELÊNCIA EM CALDEIRAS E AQUECEDORES

Fonte: Arauterm. Disponível em: http://www.arauterm.com/pdf/tbl_poder_calorifico_inferior.pdf.