



Projeto de uma central de incineração de resíduos de couro

ANA RITA SOARES GUEDES

Novembro de 2016

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

RAMO OPTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA QUÍMICA



Orientação:



À minha mãe e ao meu pai por todo carinho, apoio, dedicação e paciência.

Agradecimentos

Ao longo deste projeto, foram diversas as pessoas que me acompanharam e a quem gostaria de agradecer, pois seria impossível a concretização desta dissertação sem elas.

Ao Engenheiro Crispim, por toda a orientação, disponibilidade, acompanhamento, compreensão e partilha de conhecimentos, juntamente com o Engenheiro Lerenó pela supervisão do projeto e por todo o apoio dado ao longo destes meses.

Aos meus pais e aos meus avós por todos os valores que me transmitiram.

A todos que contribuíram para a minha formação no ISEP.

Aos que nestes anos intervieram na minha metamorfose enquanto ser humano, em circunstâncias tão diferentes das de hoje.

Ao meu primo que me levou a escolher este curso.

Ao Renato por toda a força de vontade que me transmitiu e pelas boas distrações que me foi proporcionando.

Ao Emanuel pelas horas perdidas a ouvir as minhas questões e pelas tão valiosas opiniões.

Aos meus amigos, por me apoiarem e motivarem a desenvolver um bom trabalho.

A todos, muito obrigado.

Resumo

O presente projeto surgiu em resposta à dissertação exigida para o grau de mestre, no ramo de otimização energética na indústria química e é referente ao dimensionamento de uma central de incineração de resíduos de couro proveniente da indústria do calçado.

Após a informação fornecida pelo CIETI, sabe-se que diariamente são gerados 18 ton/dia de resíduos de couro da indústria de calçado no concelho de Felgueiras, com uma humidade de 12 %. No entanto, no concelho em questão existe um aterro que tem servido de depósito nos últimos anos, e como tal, para reduzir a contaminação ambiental, e aumentar o rendimento da central de incineração, entendeu-se ser adequado retirar diariamente 22 ton /dia de resíduos de couro do aterro, com 52 % de humidade, para complementar a alimentação ao sistema, num total de 30 ton/dia.

Face a uma primeira análise do problema, o dimensionamento consistiu em 3 equipamentos essenciais: o secador, o triturador e o sistema fornalha/caldeira.

Na sequência dos cálculos efetuados no que respeita a balanços de massa, balanços de energia, dimensionamento e quantificação do investimento, concluiu-se o da necessidade de um secador rotativo com 2 m de diâmetro e 24 m de comprimento, 182.4 ton/dia de ar de secagem, e necessidade térmica de 317 kW. Será necessário um triturador para reduzir a granulometria dos resíduos de couro. O sistema de fornalha/caldeira tem um potencial de produção de vapor igual a 6,91 ton/h (6,4 ton/h por indicação do fornecedor) nas condições de 40 bar e 450°C. Será necessário um investimento de 1 303 349 euros para esta unidade.

Palavras-Chave: resíduos de couro, incineração, secagem, teor de humidade e vapor

Abstract

This project came up as an answer to the dissertation required for master degree, in the energetic optimization field in chemical industry, and refers to an incineration plant scaling for leather waste, from the industry of shoes.

After the information provided by CIETI, it's known that daily are produced about 18 ton/day of leather waste from the industry of shoes in Felgueiras county, with 12% of humidity level. However, there is a landfill in the county that as been used for years as a deposit for this type of waste, so, to reduce the environmental foot print, and to improve the efficiency of the incineration plant, it was understood, daily, remove of the landfill 22 ton/day of leather waste with with 52% of humidity.

After a first analysis of the problem, the scaling consisted in three essential equipments: the drying machine, the crushing machine and the furnace/boiler system.

There were made calculations about mass and energy balances, the scaling and Investment quantification and has been concluded about a need of a rotary dryer with a length of 24 m and the diameter of 2 m, 182.4 ton/day of air and a termic need of 317 kW. It will be necessary a crushing machine to reduce the particles granulometry. The furnace/boiler system will provide 6,91 ton/h of steam a 40bar and 450°C. The necessary investment it will be about 1 303 349 euros for this unit.

Keywords: leather waste, incineration, drying, humidity level and steam.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice	ix
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas.....	xiii
Nomenclatura.....	xv
Siglas	xvii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento do tema.....	1
1.2. Indústria de calçado	1
1.2.1. Impacto Ambiental	3
1.3. Objetivos do trabalho	6
1.4. Estrutura da dissertação	6
2. Estado da Arte	7
2.1. Toxicidade do Crómio.....	7
2.2. Tratamento de resíduos de couro	8
2.3. Incineração	10
2.3.1. Condições de queima eficiente	14
2.4. Dioxinas	15
2.5. Normas	16
2.6. Equipamentos	17
2.6.1. Secagem.....	17
2.6.2. Trituração.....	20
2.6.3. Gerador de vapor	21
2.6.3.1. Fornalha	22
2.6.3.2. Caldeira.....	28
2.6.3.3. Equipamentos para recuperação energética	32
2.7. Bombas.....	33
3. Projeto.....	37
3.1. Instalação.....	39
3.1.1. Diagrama do processo.....	39
3.1.2. Diagrama de instrumentação e controlo	40
3.1.3. <i>Layout</i> da instalação.....	43
3.2. Balanços de materiais e energéticos.....	44
3.2.1. Secador	44
3.2.2. Fornalha.....	45

3.3. Dimensionamento	45
4. Quantificação do investimento	49
5. Conclusões	51
5.1. Conclusão	51
5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	52
Bibliografia	53
A. Anexos A.....	57
B. Anexo B	67
C. Anexo C.....	69
D. Anexo D.....	73
E. Anexo E	76

Índice de Figuras

Figura 1.1- Fabricação de sapatos. ⁽⁶⁾	2
Figura 2.1- Mecanismo de oxidação do Cr^{3+} para Cr^{6+} . ⁽¹⁾	8
Figura 2.3- Gestão de resíduos de couro. ⁽⁸⁾	10
Figura 2.2- Análise termogravimétrica do couro. ^(3; 21)	13
Figura 2.4- Estrutura orgânica da família das dioxinas. ⁽²⁸⁾	15
Figura 2.5- Ilustração de um secador de rotativo. ⁽³³⁾	18
Figura 2.6- Esquema das três etapas dentro do secador, com o conseqüente perfil de temperaturas. ⁽³⁴⁾	19
Figura 2.7- Esquema de uma caldeira com um sistema de combustão em suspensão. ⁽³⁹⁾	22
Figura 2.8- Esquema de uma caldeira com um sistema de combustão em grelha ⁽³⁹⁾ . 23	
Figura 2.9- Esquema de uma caldeira com um sistema de combustão em leite fluidizado. ⁽³⁹⁾	24
Figura 2.10- Tabela estequiométrica para a combustão completa e incompleta.	27
Figura 2.11- Esquema representativo do diagrama de Ostwald ⁽⁴³⁾	28
Figura 2.12- Esquema ilustrativo de uma caldeira aquatubular. ⁽⁴⁵⁾	29
Figura 2.13- Esquema ilustrativo de uma caldeira de tubos de fumo. ⁽⁴⁵⁾	30
Figura 2.14- Representação esquemática dos tipos de bombas. ⁽⁴⁷⁾	33
Figura 2.15- Ilustração de uma bomba centrífuga em duas vistas, de cima e frontal. ⁽⁴⁸⁾	35
Figura 3.1- Diagrama do processo, com todas as correntes representadas.	39
Figura 3.2- Representação do diagrama PID do secador.	41
Figura 3.3- Representação do diagrama PID da caldeira.	42
Figura 3.4- Representação do layout da instalação.	44
Figura A.1- Esquema do secador, incluindo todas as correntes.	57
Figura A.2- Representação das correntes que envolvidas na fornalha.	60
Figura C.1- Calor específico dos componentes dos gases de combustão, a pressão constante e a temperatura variável.	69
Figura C.2- Esquema e cálculos referentes ao triângulo de Ostwald.	70
Figura C.3- Diagrama da carta psicométrica, com prolongamento até ao 160°C	71
Figura C.4- Diagrama de Moody de onde foi retirado o fator de fanning.	72
Figura C.5- Perdas por atrito através das válvulas e ligações para regimes turbulentos.	72
Figura D.1- Orçamento de uma caldeira, via e-mail.	73
Figura D.2- Orçamento do triturador, via e-mail.	74

Figura D.3- Orçamento de uma bomba para a instalação, via e-mail. 75

Índice de Tabelas

Tabela 1.1- Ranking nacional dos concelhos com maior produção de calçado. ⁽⁶⁾	2
Tabela 1.2- Consumos específicos de energia (kWh/par) ⁽¹¹⁾	5
Tabela 2.1- Vantagens e desvantagens da incineração. ⁽¹⁵⁾	12
Tabela 2.2- Comparação do poder calorífico, do teor de enxofre, cinzas e o grau de reutilização de vários produtos ^(21; 22)	13
Tabela 2.3- Comparação das características dos três principais processos de combustão. ⁽³⁹⁾	24
Tabela 2.4- Resumo das vantagens e desvantagens das diferentes caldeiras. ⁽³⁸⁾ ...	31
Tabela 3.1- Caracterização dos resíduos de couro provenientes diretamente da indústria. ^(50; 51)	37
Tabela 3.2- Análise elementar das matérias-primas realizada pelo LNEG. ^(50; 51)	38
Tabela 3.3- Resultados dos valores das resíduos de couro acabado que provém do aterro. ^(50; 51)	38
Tabela 3.4- Valores obtidos para o diâmetro, comprimento e tempo de secagem.	45
Tabela 3.5- Valores arbitrados para calcular as dimensões da fornalha.	46
Tabela 3.6- Valores obtidos para a área da grelha, área livre, volume da câmara de combustão, rendimento, altura da câmara de combustão e temperatura da chama. ..	46
Tabela 4.1- Custos associados aos equipamentos.....	49
Tabela 4.2 - Custo dos equipamentos auxiliares e instalação do equipamento.	50
Tabela A.1- Caudal mássico e caracterização das correntes do secador.....	57
Tabela A.2- Valores observados na carta psicrométrica.....	58
Tabela A.3- Valores do calor específico do ar húmido e da entalpia das correntes Be e Bs.	59
Tabela A.4- Valores conhecidos das correntes que atravessam a fornalha.....	60
Tabela A.5- Valores do Cp consoante a temperatura e a respetiva energia térmica. ⁽⁴⁵⁾	61
Tabela A.6- Valores determinados pelos balanços mássicos, dos caudais da corrente E, J e H e a temperatura de combustão.....	61
Tabela A.7- Valores arbitrados. ^(40; 41)	62
Tabela A.8- Valores das entalpias de vapor saturado e sobreaquecido a diferentes pressões. ⁽⁵³⁾	65
Tabela A.9- Valores do calor específico de cada constituinte dos gases, assim como o calor específico médio. ⁽⁴⁵⁾	65
Tabela B.1- Representação da tabela estequiometria da reação completa de combustão.....	67

Tabela B.2- Representação da tabela estequiometria da reação completa de combustão com 30% de excesso de ar..... 68

Nomenclatura

A_g	Área total da grelha	m^2
A_i	Área livre da grelha	m^2
c_p	Calor específico	$\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$
d	Diâmetro	m
d_{cc}	Diâmetro da câmara de combustão	m
E	Energia necessária por unidade de tempo	W
G	Caudal de ar	kg/dia
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
G'	Fluxo de ar	$\text{Kg}/(\text{m}^2\text{h})$
H_{Ae}	Entalpia da corrente A à entrada	kJ/kg
H_{As}	Entalpia da corrente A à saída	kJ/kg
H_{Bs}	Entalpia da corrente B à entrada	kJ/kg
H_{Bs2}	Entalpia da corrente B à saída	kJ/kg
h_{cc}	Altura da câmara de combustão	m
K	Carga térmica volumétrica	$\text{kJ}/(\text{sm}^3)$
m_{Ae}	Massa à entrada	ton/dia
m_{As}	Massa à saída	ton/dia
N_c	Taxa de carregamento ou de combustão	$\text{kg}/(\text{hm}^2)$
PCI	Poder calorífico inferior do combustível	kJ/kg
Q	Calor que o secador troca com o exterior	kJ/kg
Q_u	Energia necessária para aquecer o ar na fornalha	kJ/h
Re	Número de Reynolds	
S'	Caudal do sólido seco	Kg/dia
T_{Ae}	Temperatura da corrente A à entrada do secador	$^\circ\text{C}$
T_{As}	Temperatura da corrente A à saída do secador	$^\circ\text{C}$
T_{Bs}	Temperatura da corrente B à entrada do secador	$^\circ\text{C}$
T_{Bs2}	Temperatura da corrente B à saída do secador	$^\circ\text{C}$
T_w	Temperatura de saturação do sólido à saída do secador	$^\circ\text{C}$
v	Velocidade	m/s
V_{ar}^t	Volume teórico de ar necessário à queima de 1 kg de combustível	kg/m^3
V_{cc}	Volume da câmara de combustão	m^3
W	Potência	W

W_g	Caudal mássico do ar	kg/h
Z	Comprimento	m
ΔH	Calor latente de vaporização	kJ/kg
λ	Calor latente de vaporização	kJ/kg
ρ	Densidade	kg/m ³
\dot{m}_c	Caudal de combustível	kg/h
$\sum F_{1 \rightarrow 2}$	Somatório das perdas	J/kg
ΔT	Gradiente de temperaturas	
ΔT	Gradiente de Pressão	
μ	Viscosidade	Pa.s

Siglas

CEE	Consumo Especifico de Energia
CIETI	Centro de Inovação em Engenharia e Tecnologia Industrial
CO	Monóxido de carbono
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
Cr	Crómio
DRE	Eficiência de destruição e remoção de substâncias perigosas
ENE	Estratégia Nacional de Energia
EPA	Environmental Protection Agency
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	Internaction Standard Organisation
NO _x	Óxidos de Azoto
PCI	Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg)
PID	Proportional integral derivative
PTS	Material Particulado
SO ₂	Dióxido de enxofre
TGA	Termogavimetria
UV	Ultravioleta
PIB	Produto Interno Bruto
PCBs	Bifenilos policlorados

1. Introdução

No âmbito disciplinar do Mestrado de Engenharia Química do Instituto Superior de Engenharia do Porto, foi desenvolvida a presente dissertação acerca do tratamento de resíduos de couro provenientes da indústria do calçado do concelho de Felgueiras.

1.1. Enquadramento do tema

No concelho de Felgueiras, encontram-se sediadas várias empresas responsáveis pela fabricação de calçado. Ao longo do processo de fabricação são gerados resíduos sólidos, nomeadamente resíduos de couro.

O principal problema ambiental dos resíduos de couro é a presença de crómio, proveniente da etapa de curtume da indústria transformadora da pele animal em couro. A presença do crómio torna-se nociva quando os resíduos são colocados em aterros pois, devido às condições ambientais circundantes, acabam por se degradar quimicamente e eventualmente permitir a contaminação de solos e águas subterrâneas. Além desta contaminação, existe a possibilidade do crómio passar do estado de oxidação 3+ a 6+, que apresenta propriedades cancerígenas e tóxicas para o meio ambiente, e consecutivamente para o ser humano.⁽¹⁻⁵⁾

No sentido de contribuir para solucionar este problema, foi proposto o estudo de uma solução alternativa para os habituais aterros, sem nunca esquecer as metas e normas europeias de proteção ambiental.

É neste âmbito que surge o projeto de uma central de incineração dos resíduos de couro.

1.2. Indústria de calçado

Na entrada de Portugal para a Comunidade Económica Europeia, foi praticamente exigido ao setor industrial de produção de calçado que se modernizasse no sentido de aumentar a sua competitividade. Seria de esperar que a indústria arcaica de calçado português não resistisse perante a concorrência europeia, nomeadamente italiana. De facto, durante alguns anos, este setor sofreu um decréscimo de vendas, um aumento do número de desempregados e uma diminuição do número de empresas transformadoras.



Figura 1.1- Fabricação de sapatos. ⁽⁶⁾

Atualmente, a indústria de calçado português utiliza técnicas avançadas, proporcionando a disputa de preços com Itália. O valor de exportações do calçado português alcança cerca 71 milhões de pares de sapatos por ano, resultando num montante de 1600 milhões de euros. Este aumento das exportações deve-se a alguns fatores:

- Inovação de técnicas;
- Inovação de materiais;
- Avançada tecnologia;
- Criação de marcas e tendências apelativas para os clientes de todo o mundo.

A indústria portuguesa de calçado continua ao longo dos últimos anos a fixar-se nos mesmos centros geográficos, dividindo-se em duas principais zonas:

- Guimarães e Felgueiras
- Santa Maria da Feira, Oliveira de Azeméis e São João da Madeira.

Em todas estas cidades, é notável a grande percentagem de profissionais aptos e conhecedores desta indústria e, como tal, o setor do calçado acaba por ser responsável por uma grande parte da economia local. ⁽⁶⁾

Tabela 1.1- Ranking nacional dos concelhos com maior produção de calçado. ⁽⁶⁾

Ranking	Concelho	%
1º	Felgueiras	35.1
2º	Santa Maria da Feira	12.2
3º	Oliveira de Azeméis	11.9
4º	Guimarães	11.8
5º	São João da Madeira	5.1

Como se pode observar na Tabela 1.1, o concelho de Felgueiras é o que contém uma maior produção de calçado e, como tal, é também o que gera mais resíduos de couro.⁽⁶⁾

A câmara de Felgueiras dedica-se a apoiar os industriais do concelho e dos concelhos vizinhos, de forma a darem resposta às diretivas impostas pela União Europeia. Principalmente no que respeita às normas ambientais, focando-se no principal problema do tratamento de resíduos provenientes da produção de calçado. Para minimizar e agilizar este problema para as empresas, a Câmara de Felgueiras levou a cabo a construção do primeiro aterro de resíduos industriais equiparados a urbanos do país, edificando assim um Aterro de Resíduos Industriais, com a finalidade de tratar e acondicionar os resíduos provenientes da indústria do calçado.

Tal como num típico aterro, os resíduos são depositados em camadas sucessivas, separadas por terra, até que o aterro seja fechado, impermeabilizado e arborizado, de forma a ficar integrado na paisagem. Para garantir uma boa construção da infraestrutura, a Câmara de Felgueiras fez-se acompanhar do Gabinete de Apoio Técnico do Vale do Sousa, da Direção Geral do Ambiente e do Instituto Nacional dos Resíduos.⁽⁷⁾

No entanto, este aterro está a ficar sobrelotado, o que obriga a pensar numa forma de solucionar este problema que consiste em duas possibilidades: continuidade do aterro com a consequente expansão, ou adoção de uma alternativa válida, situação em estudo neste trabalho.

1.2.1. Impacto Ambiental

O processo de fabrico do calçado envolve vários materiais, desde peles, plásticos, borrachas, entre outros. A fabricação destes produtos provoca impactos ambientais, desde a extração da matéria-prima até ao produto final.

Os aspetos ambientais mais significativos nesta indústria estão associados à produção de resíduos sólidos, contaminação da água, poluição do ar e poluição sonora.

A poluição do ar está muito associada aos processos de aplicação de colas, endurecedores, primários e halogenantes, assim como à respetiva secagem e aos sistemas de aspiração de partículas associados a processos de cardagem mecânica. Os poluentes associados a estas fontes são essencialmente os compostos orgânicos voláteis (COV) e o material particulado (PTS). As emissões de compostos orgânicos voláteis são potencialmente prejudiciais à saúde e ao ambiente. Para além disto, confirma-se que nesta indústria são utilizados equipamentos e sistemas que enviam substâncias para a atmosfera e que contribuem para o empobrecimento da camada do ozono, tais como: aparelhos de ar condicionados, máquinas de moldar contrafortes, fornos a frio,

equipamentos de arrefecimento de água, arcas congeladoras/ frigoríficos, máquinas de injeção de solas (alguns tipos), entre outros.

A contaminação da água está essencialmente ligada às cabines de pintura e aos sistemas de aspiração do tipo hidrofiltro. Estas águas devem ser encaminhadas para os devidos locais, para que se evite a infiltração nos solos.

No que respeita ao ruído ambiente, a análise efetuada a este sector possibilitou verificar que, no geral, o impacto ambiental das empresas é reduzido. Contudo, torna-se indispensável alertar as empresas para efetuarem auditorias periódicas para salvaguardar alterações no processo suscetíveis de modificar os níveis de ruído projetados para o ambiente.⁽⁸⁻¹⁰⁾

É necessário que esta indústria tome medidas para que consiga contribuir de forma menos negativa para o ambiente, dando a cada par de sapatos uma nova vida mais verde.

Nos últimos anos, tanto os países desenvolvidos como os países em desenvolvimento, têm adotado políticas de combate aos elevados consumos de energia associados às suas indústrias. O consumo total de energia das indústrias equivale a um terço do consumo de energia total no mundo.

Até agora, já se registaram algumas melhorias significativas no que diz respeito a eficiência energética. No entanto, o consumo de energia na indústria continua a aumentar devido aos aumentos significativos no volume de bens produzidos.

Como não está previsto nenhum decréscimo do consumo de energia nestas indústrias, é necessário a implementação de medidas que visem a poupança de energia e o seu uso mais eficiente.

Considerando que o sector industrial é responsável por uma grande parte do consumo de energia, conclui-se que também é responsável pela emissão de gases que contribuem para o efeito estufa. As poupanças de energia neste sector assumem-se como uma das opções mais atrativas e exequíveis para ir ao encontro de imposições legais sob o ponto de vista energético. Portugal tem desenvolvido algumas estratégias de combate a esta questão, tal como a Estratégia Nacional de Energia (“ENE”), lançada em Abril de 2010. Os objetivos fundamentais deste plano para o ano de 2020 são os seguintes:

- Dependência: reduzir dependência energética do país face ao exterior para 74% (foi de 83% em 2008) e reduzir em 25% o saldo importador energético com a energia produzida a partir de fontes endógenas;
- Renováveis: 60% da eletricidade produzida e 31% do consumo de energia final tenham origem em fontes renováveis; criar mais 100.000 postos de trabalho a

acrescer aos 35.000 já existentes (45.000 diretos e 90 000 indiretos) no sector das energias renováveis; o impacto no PIB passará de 0,8 % para 1,7 % até 2020;

- Eficiência: redução de 20% do consumo de energia final, nos termos da política Comunitária para a energia e desenvolver um *cluster* industrial associado à promoção da eficiência energética, assegurando a criação de 21 000 postos de 44 trabalho anuais, gerando um investimento previsível de 13.000 milhões de euros até 2020 e proporcionando exportações equivalentes a 400 milhões de euros;
- Ambiente: o cumprimento das metas de redução de emissões assumidas pela ENE 2020 visa implementar uma série de medidas e estratégias através da utilização de cinco grandes vetores. Este vetores são: competitividade, crescimento e independência energética e financeira; aposta nas energias renováveis; promoção da eficiência energética; garantir segurança no abastecimento energético; sustentabilidade económica e ambiental.⁽¹¹⁾

Na Tabela 1.2, encontram-se representados os consumos específicos de energia das empresas de calçado em vários países da União Europeia.

Tabela 1.2- Consumos específicos de energia (kWh/par)⁽¹¹⁾

País	CEE médio (kWh/par)	CEE mínimo (kWh/par)	CEE máximo (kWh/par)	Nº Empresas avaliadas
Bulgária	1.2 a 3.6	0.4	4.6	30
Itália	-	0.7	7.1	3
Portugal	1.1 a 2.9	0.8	4.7	21
Roméia	0.5 a 3.9	0.4	6.3	25
Espanha	0.8 a 2.0	0.5	4.7	27
Reino Unido	-	8.9	9.3	2

Um aproveitamento eficaz dos resíduos de couro, pode ajudar esta indústria a minimizar o impacto ambiental, e consequente ajudar o País nos objetivos traçados para 2020, sendo esta uma indústria com grande peso na economia nacional.

1.3. Objetivos do trabalho

O principal objetivo desta dissertação consiste em projetar a instalação de incineração para resíduos de couro curtidos com crómio. Deste modo, deverão ser cumpridas as seguintes metas:

- Dimensionamento de uma etapa de secagem para os resíduos provenientes do aterro;
- Selecionar um triturador para os resíduos provenientes da secagem e da indústria;
- Dimensionamento da fornalha, para incineração dos resíduos;
- Selecionar da caldeira para a produção do vapor que irá servir para produzir eletricidade.

1.4. Estrutura da dissertação

O documento foi dividido em 5 capítulos, sendo estruturados da seguinte forma: introdução, estado da arte, projeto, quantificação do investimento e conclusão.

No primeiro capítulo menciona-se o âmbito e os objetivos da dissertação. Para isso: efetua-se o enquadramento do tema; introduz-se a indústria de calçado português e o seu impacto ambiental; discriminam-se os objetivos do trabalho e estrutura da dissertação.

O segundo capítulo destina-se a descrever o procedimento para a incineração, referindo todos os equipamentos necessários e as etapas para o seu dimensionamento.

O terceiro capítulo é destinado à aplicação prática dos conhecimentos base apresentados no capítulo 2. Começa por ilustrar o diagrama PID da instalação, apresenta os balanços materiais e energéticos do sistema e, por fim, apresenta o dimensionamento dos equipamentos utilizados na central de incineração.

No quarto capítulo quantifica-se o investimento necessário e, por fim, no quinto, capítulo, faz-se uma análise dos resultados apresentando-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Estado da Arte

2.1. Toxicidade do Crómio

Como já foi referido, a indústria do calçado utiliza várias matérias-primas para a fabricação do seu produto final, desde do couro até à borracha. O couro utilizado nesta indústria é proveniente da indústria de curtumes, que recorre a uma técnica denominada de curtume para estabilizar termicamente a pele e impedir a sua putrefação fornecendo também características positivas para a produção do produto final. ⁽¹²⁾

Atualmente, e na maior parte das situações, o curtume é efetuado através da aplicação de sais de crómio. ⁽¹³⁾

Como cada vez mais o meio ambiente necessita de ser preservado, têm-se procurado processos que minimizem os resíduos prejudiciais das indústrias para os ecossistemas.

A preparação dos sapatos requer que as peças sejam cortadas, preparadas e montadas, gerando-se resíduos. Estes, quando o material é couro, contêm crómio proveniente do processo de curtume que, embora no estado trivalente, pode passar ao estado hexavalente que é considerado muito tóxico. ⁽²⁾

A quantidade de resíduos gerados pelas indústrias de calçado tem vindo a aumentar, visto que a quantidade exportada de produto final também tem ampliado, sendo inevitável o aumento dos resíduos gerados. ⁽¹²⁾

O crómio é um dos principais metais que contaminam o solo e a água subterrânea. É um metal de transição, sendo considerado duro, frágil e com uma coloração cinza semelhante ao aço, incluindo para além da cor, a sua resistência à corrosão.

Este metal, quando o estado de oxidação 3+ ou 2+, encontra-se estável. Por sua vez os estados de oxidação 4+ e 5+ são pouco frequentes. O seu maior estado de oxidação é 6+ (crómio hexavalente). ⁽¹⁴⁾

A oxidação do Cr^{3+} a Cr^{6+} encontra-se apresentada na Figura 2.1 e pode ser catalisada pela presença de radiação UV e calor. ^(1: 3: 4)

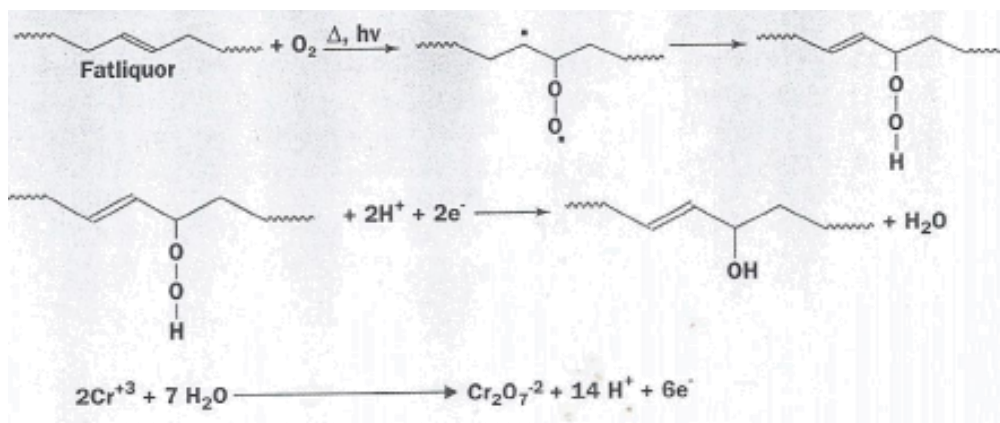


Figura 2.1- Mecanismo de oxidação do Cr³⁺ para Cr⁶⁺.⁽¹⁾

O crómio só é considerado tóxico quando está no estado hexavalente. Proporciona uma ação irritante e corrosiva no corpo humano através da inalação, ingestão ou contacto com a pele. Este elemento encontra-se nas listas de materiais com elevada toxicidade, nos quais deve existir um controlo muito rigoroso.

Os compostos de crómio trivalente possuem baixa toxicidade, mas compostos hexavalentes são oxidantes fortes e tóxicos, com problemas de nível cancerígeno, mutagénico e teratogénico. ^(3: 4)Para além disso, também provocam vários problemas a nível respiratório.⁽⁵⁾

2.2. Tratamento de resíduos de couro

O desenvolvimento de alternativas que permitam a reutilização do resíduo de couro, ou a sua conversão em produtos úteis, é uma urgência a nível ambiental, visto que as leis ambientais têm sofrido um acréscimo no grau de exigência e severidade, impondo que as pequenas e grandes empresas consigam arranjar uma forma de reaproveitar os resíduos.

Na tentativa de conseguir minimizar os resíduos de couro, são lembradas as seguintes sugestões:

- Hidrólise dos resíduos de couro

A hidrólise é a quebra de cadeias polipeptídicas em pequenas porções de peptídicos ou em aminoácidos, provocada pelo aquecimento da proteína em soluções ácidas ou alcalinas. ⁽²⁴⁾

• Pirólise dos resíduos de couro

Ao contrário da combustão e da gasificação, em que a matéria orgânica reage com o oxigénio, na pirólise provoca-se a decomposição da matéria orgânica sem contacto com o ar, por aquecimento a temperaturas que podem oscilar entre 400 e 800°C. A pirólise tem como função transformar os resíduos poliméricos em produtos químicos ou combustíveis. A deterioração de polímeros é alcançada através do aquecimento do material a elevadas temperaturas, sendo necessária uma atmosfera livre de oxigénio. ⁽¹⁸⁾Os produtos relevantes da pirólise são:

- Gases que dependem do tipo de resíduo a tratar;
- Líquidos como o alcatrão de hulha, ácido acético, metanol e hidrocarbonatos oxigenados;
- Sólidos, tipicamente um carvão essencialmente constituído por carbono e elementos residuais.

Estes processos são endotérmicos, pois é necessário fornecer calor para que a reação da pirólise se possa processar. ⁽¹⁹⁾

• Formação de um aglomerado

Um aglomerado consiste num conjunto de fragmentos com dimensões semelhantes, unidos por uma cola e prensados para que ocorra uma correta compactação do granulado.

Aglomerados de couro para produção de materiais flexíveis ou placas rígidas podem ser utilizados nas indústrias da moda e automóvel. ⁽²⁵⁾

• Incineração dos resíduos de couro

A incineração tem como objetivo a queima dos resíduos de couro, podendo ser aproveitado o calor proveniente da reação para a produção de vapor. Apresenta também a vantagem de diminuir o volume de resíduos.

• Aterro dos resíduos de couro

Deposição dos resíduos em camadas sucessivas e separados por terra. Podem contribuir para a contaminação dos solos.

Na figura 2.2, estão ilustradas alguns dos tratamentos mais comuns para a generalidade dos resíduos.

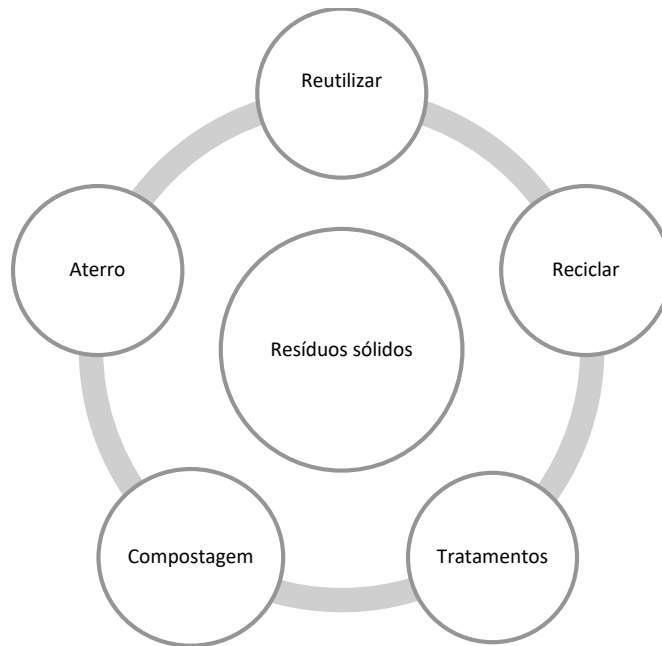


Figura 2.2- Gestão de resíduos de couro.⁽⁸⁾

Optou-se neste trabalho por efetuar o estudo da incineração dos resíduos de couro e conseqüente um aproveitamento do conteúdo energético dos gases de combustão para a produção de vapor sobreaquecido.

2.3. Incineração

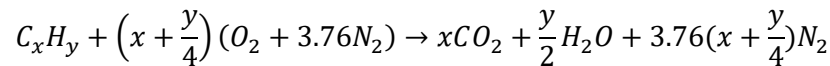
A incineração reside no tratamento de resíduos por via térmica, com ou sem recuperação de calor, produzido na combustão, sendo este processo efetuado a altas temperaturas.⁽¹⁵⁾

Em 1993 Liñán e Williams definem combustão como sendo a ciência das reações químicas exotérmicas em escoamentos com transmissão de calor e massa.⁽¹⁶⁾ Para que ocorra esta reação química é necessária a existência de um combustível e de um comburente.⁽¹⁷⁾

Na situação em estudo, o principal combustível são resíduos de couro. Caso haja uma queima controlada de resíduos é possível que se recupere o poder calorífico envolvido através da produção de vapor.⁽¹⁸⁾

Para uma queima controlada, deve-se regular a quantidade de oxigênio introduzido inserindo unicamente a quantidade necessária, garantindo assim uma combustão estequiométrica. Para que a combustão seja completa, a quantidade de oxigênio introduzido é superior à requerida estequiometricamente.

Na equação seguinte, está representada a combustão teórica sendo o oxigénio o comburente.



Mesmo em condições normais de operação, os processos de combustão não garantem aproveitamento total de energia disponível do combustível uma vez que muita desta energia é desperdiçada para o meio ambiente, quer pelas cinzas que saem pela chaminé quer pelas perdas nas paredes dos equipamentos.

A incineração de resíduos ocorre em fornalhas e deve-se ter atenção ao seu dimensionamento, uma vez que se for incorreto pode afetar o rendimento. O projeto de uma fornalha deve considerar os seguintes aspetos importantes para o seu bom funcionamento e para uma maior rentabilidade:

- Volume adequado à quantidade de combustível que se deseja queimar;
- Altura conciliável com a circulação de água nos tubos e tempo efetivamente gasto para queimar o combustível no interior da câmara;
- Distribuição apropriada dos queimadores para evitar qualquer contacto direto da chama com tubos de água;
- Dimensão adequada da grelha, para os combustíveis sólidos;
- Configuração adequada da câmara, no sentido de favorecer a queima e garantir fluxo regular dos gases de combustão.
- Temperaturas compatíveis com o equipamento e com o próprio combustível.

Os centros de incineração podem ser formados por quatro unidades essenciais que facilitam o seu bom funcionamento, tais como: uma unidade de pré-tratamento e armazenamento de resíduos; uma unidade de combustão; uma unidade de recuperação e conversão de energia e uma unidade de depuração e controlo de efluentes. ⁽¹⁹⁾

A queima em incineradores, apesar de eficaz, nunca é total, acabando por levar à formação de efluentes sólidos e gasosos. Os resíduos sólidos são, por exemplo, as cinzas e as escórias. Os resíduos gasosos são óxidos de azoto (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), gases ácidos, dioxinas e furanos e metais pesados. Todos estes resíduos provenientes da queima devem ser controlados e tratados de forma a poder respeitar as normas europeias. ⁽²⁰⁾

O processo de incineração apresenta vantagens e desvantagens, tal como representado na *Tabela 2.1*.

Tabela 2.1- Vantagens e desvantagens da incineração. ⁽¹⁵⁾

<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
Diminuição do volume e da massa dos resíduos (cerca de 90% do volume e 90%-95% da massa)	Alto preço do equipamento
Asseptização dos resíduos	Insuficiência na queima total dos resíduos
Mão-de-obra reduzida	Produção de resíduos não queimados contaminados
Baixo custo de funcionamento	
Os processos mais modernos apresentam baixos níveis de poluição	

Como já foi referido anteriormente, os resíduos desta indústria podem ser tratados de diferentes formas. No entanto, a opção escolhida também pode ter contraindicações tais como:

- A elevada temperatura no núcleo pode dar origem à formação e emissão de compostos voláteis perigosos;
- À medida que a temperatura vai diminuindo, ocorre uma combustão incompleta do resíduo, produzindo vapores e odores desagradáveis;
- A cinza resultante da queima contém óxido de crómio que pode ser arrastado pela chuva até aos solos.

Como tal, é importante que a incineração dos resíduos de couro seja efetuada num regime controlado, podendo assim recuperar parte da energia envolvida na combustão. A diminuição do volume dos resíduos e o aproveitamento energético são as principais vantagens deste processo.

A progressiva consciencialização pública acerca do respeito pelo meio ambiente, o aumento dos requisitos legislativos sobre a proteção ambiental, o aumento do volume de resíduos e a carência de recursos energéticos, são os fatores que impulsionam a recuperação da energia através dos resíduos das indústrias de calçado. ^(3: 21: 22)

Tabela 2.2- Comparação do poder calorífico, do teor de enxofre, cinzas e o grau de reutilização de vários produtos (21: 22)

Produto	Poder calorífico (cal /g)	Enxofre (%)	Cinzas (%)	Grau de reutilização (%)
Antracite	5000-8000	<2	<8	30
Madeira	2000-4000	<0.5	3-8	0
Resíduos urbanos	1000-3000	<1	20-30	0
Derivados do petróleo	7000-8000	5-6	0.5	0
Resíduos de couro	4500-5000	<2	4-6	95

A forte atração pela recuperação energética através dos resíduos de couro deve-se essencialmente às características deste material. Como é visível na Tabela 2.2, o couro apresenta um poder calorífico relativamente alto e um baixo teor de enxofre que o tornam atraente para este tipo de aproveitamento. (3: 21; 22)

Para conhecer os aspetos termodinâmicos da incineração, analisou-se a Figura 2.3, que representa uma análise termogravimétrica a uma amostra de couro. A análise termogravimétrica (TGA) é a técnica que mede a variação de massa, quando a amostra é submetida a uma variação de temperatura controlada. Esta variação termogravimétrica representa uma amostra de couro em atmosfera normal de ar, onde ocorre uma ignição a baixa temperatura. (23)

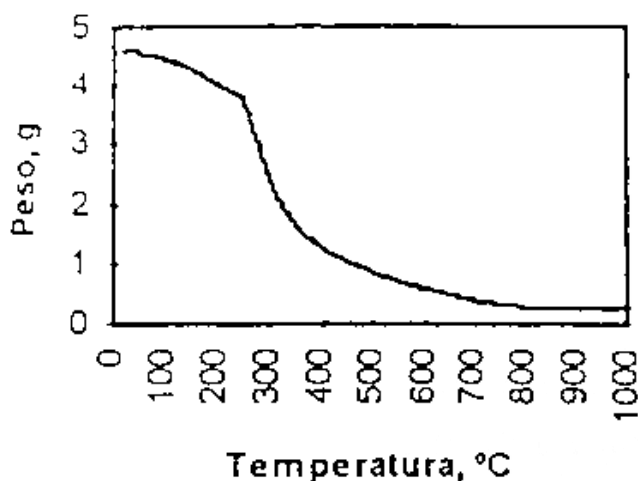


Figura 2.3- Análise termogravimétrica do couro.(3: 21)

Como se pode verificar na Figura 2.3, a quantidade mássica da amostra tende a diminuir com o aumento da temperatura. No entanto, para valores superiores a 800°C, o peso das cinzas tende a estabilizar. Isto indica que todas as reações de hidrocarbonetos e seus derivados ocorrem antes dos 800°C. (21)

No entanto, as temperaturas de combustão são superiores a 1000°C, dependendo do combustível, o que leva a concluir que já ocorreram todas as reações.

2.3.1. Condições de queima eficiente

A eliminação da matéria orgânica presente no interior de um forno depende principalmente de dois princípios: características da substância e características e condução de calor do forno.

Em relação às características das substâncias, os principais fatores são as dimensões das partículas utilizadas na queima e o tempo necessário até se tornarem voláteis e serem destruídas, que está interrelacionado com a energia de ativação.

No que depende das características do forno, tanto a capacidade do sistema como a temperatura utilizada são os fatores mais importantes. Estes dois fatores irão afetar o tempo de residência do material. O cumprimento destas condições não é suficiente para garantir uma correta destruição dos compostos orgânicos, sendo necessário também que a quantidade de oxigênio seja superior à gasta nas reações de oxidação porque só assim é possível assegurar que os compostos orgânicos sejam transformados em compostos simples. Uma das formas de se perceber se a reação se deu de completamente é proceder à avaliação dos gases de combustão e estimar, principalmente, o teor de monóxido de carbono. Se este valor for nulo, é sinal que a reação se deu na totalidade. As condições da operação de incineração devem garantir um elevado índice de eficiência de destruição e remoção das substâncias perigosas.

$$DRE = \frac{m_e - m_s}{m_e} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

A equação 1 demonstra como se calcula o índice de eficiência de destruição e remoção das substâncias perigosas, em que m_e é a massa do constituinte à entrada e m_s é a massa do constituinte nos gases de combustão. Um índice de 99%, indica que 1% da massa da substância perigosa está a sair juntamente com o efluente.

Qualquer incineração de resíduos perigosos gera novos resíduos, tais como:

- Cinzas: são produtos inorgânicos que podem conter vestígios de produtos não queimados, tais como o carbono, que se encontram na forma de partículas dispersas e friáveis de variadas dimensões
- Escórias: tal como as cinzas, são produtos inorgânicos que podem conter vestígios de produtos não queimados, mas que tenham sofrido um processo de fusão durante o processo de combustão, apresentando-se como aglomerados vítreos das partículas residuais.

- Cinzas volantes: partículas orgânicas ou inorgânicas provenientes dos filtros de despoejamento dos gases de combustão. ⁽¹⁹⁾

2.4. Dioxinas

As dioxinas desenvolvem-se como subproduto de processos industriais. Neste caso, este subproduto é oriundo do tratamento das peles e desenvolve-se durante a incineração dos resíduos da indústria do calçado.

Existem dioxinas pertencem ao grupo dos compostos sintéticos mais tóxicos que se conhecem. Estes compostos apresentam uma omnipresença ambiental e conseguem resistir à degradação química ou biológica, provocando a acumulação na cadeia alimentar e nos lípidos dos tecidos, ampliando os riscos potenciais para a saúde humana e animal. ⁽²⁶⁾

As dioxinas são compostos aromáticos constituídos por carbono, hidrogénio, oxigénio e cloro. São constituídas por dois anéis de benzenos ligados com dois átomos de oxigénio, contendo oito posições para ligar átomos de hidrogénio, cloro ou outros halogéneos. A toxicidade das dioxinas depende de dois fatores, sendo um deles o número dos átomos de cloro que substituem o hidrogénio, que pode variar entre 1 e 8, e o outro a posição que os átomos de cloro ocupam na molécula.

As dioxinas podem conter oito locais onde o hidrogénio pode ser substituído. Por uma questão de avaliação do grau toxicidade é importante manter a ordem numérica das posições, como está ilustrado na figura 2.4. A dioxina mais tóxica e mais perigosa é a 2,3,7,8 — tetraclorodibenzo -p- dioxina (2,3,7,8—TCDD), pois apresenta 4 átomos de cloro em posição assimétrica.

A toxicidade aguda mais elevada verifica-se para a 2,3,7,8 - tetracloro-dibenzeno-para-dioxina (2,3,7,8 - TCDD), apresentando como dose letal 1 µg/m³, a qual é somente ultrapassada por algumas toxinas de origem natural. ⁽²⁷⁾

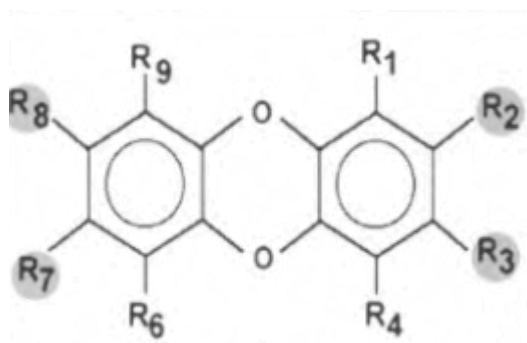


Figura 2.4- Estrutura orgânica da família das dioxinas. ⁽²⁸⁾

A contaminação ambiental por parte das dioxinas e furanos, está associada aos seguintes processos, de acordo com a *Environmental Protection Agency* (EPA):

- Uma combustão incompleta pode formar dioxinas, se as temperaturas rondarem os 200 a 600°C, e a presença de compostos orgânicos como fenol, clorobenzenos e PCBs, do cloro e dum catalisador (por exemplo cobre) podem levar à formação dos compostos tóxicos.
- A fundição de metais e as refinarias podem formar compostos durante as operações primárias ou secundárias de produção de metais, compreendendo a fusão de ferro em forno de aço elétrico, a reciclagem de sucata ferrosa ou não ferrosa, e ainda nas *flars* das refinarias, escape para produtos das refinarias;
- A indústria química quando forma subprodutos que contêm na sua composição cloro;
- Processos biológicos e fotoquímicos podem ser outra fonte de formação de dioxinas a partir da compostagem, quando estão sujeitas a certas condições ambientais, pela ação de microrganismos sobre compostos fenólicos clorados. [\(26;](#)
[27\)](#)

2.5. Normas

Para a implementação de qualquer tecnologia de tratamento de resíduos perigosos é necessário estabelecer padrões de controlo que permitam garantir um nível de cumprimento aceitável e a utilização de metodologias adequadas, bem como oferecer garantias quanto ao respeito pelas especificações e pelos limites legais.

A ISO (*International Standard Organisation*) é uma federação mundial de organismos nacionais de normalização, integrado em comités técnicos, que envolve organizações governamentais e não-governamentais. Nesta área da incineração de resíduos perigosos é fundamental que sejam assegurados sistemas de qualidade que avaliem a normalização dos processos e que fiscalizem o respeito pelas especificações e limites legais. Estes processos são assegurados com a implementação da ISO 9000. [\(19\)](#)

Na gestão da qualidade, a ISO 9000 é o conjunto composto pelas normas ISO 9000, 9001, 9004 e 19011.

- ISO 9001 - orientações sobre a qualidade dos projetos, bem como o seu desenvolvimento, produção, instalação e manutenção. É uma das normas mais específicas e demonstra como deve estar explicito o processo de cada empresa. Envolvendo as normas 9002 e 9003;
- ISO 9004 - estabelece as diretrizes para o sucesso sustentado - orientações básicas para a implantação do sistema de gestão da qualidade;
- ISO 19011 - possui as diretrizes para auditorias de sistema de gestão. [\(19;](#) [29\)](#)

2.6. Equipamentos

2.6.1. Secagem

Quando os produtos sujeitos ao processo de queima contêm uma humidade superior a 50%, grande parte da energia envolvida no processo é absorvida na evaporação da água, provocando uma diminuição da temperatura do interior da fornalha e uma diminuição do rendimento térmico.

Neste trabalho prevê-se a secagem de resíduos de couro a retirar do aterro que têm uma humidade em torno de 50%, para juntar aos resíduos de couro gerados diariamente pela indústria no sentido de assegurar um processo de queima rentável.

A secagem aqui prevista será do tipo contacto direto através de um gás quente, o ar. Este processo de secagem por gás quente pode ser contínuo ou descontínuo, mas traduz-se sempre como sendo a evaporação do líquido existente nas partículas sólidas. Esta evaporação divide-se em duas etapas principais: a difusão do líquido até à superfície e a evaporação na superfície. ⁽³⁰⁾

Nos secadores de contacto direto, o material é aquecido e seco através do ar circundante, por processos de convecção, o que tem a vantagem de facilitar a permuta de calor e massa. No entanto, apresenta a desvantagem dos gases, à saída do secador, estarem normalmente muito quentes, o que torna a eficiência térmica baixa. Podem ser efetuadas alterações que promovam o aproveitamento térmico e conseqüentemente aumentem a eficiência, que acabam sempre por aumentar o preço do equipamento.

Os secadores podem funcionar sobre vácuo ou à pressão atmosférica. Estes podem ser contínuos ou descontínuos, em que os primeiros são apropriados para elevados caudais e os segundos para pequenas quantidades.

Podem ser utilizados diferentes tipos de secadores, sendo mais comuns os secadores de tabuleiros, pulverização, rotativos e de leito fluidizado. ⁽³¹⁾

A secagem de partículas sólidas em regime contínuo, emprega normalmente a utilização de secadores rotativos. Esta escolha é justificada pelos baixos custos de implementação, manutenção e a fácil utilização. Para esta instalação em concreto, o secador que mais se adequa é um secador rotativo em regime contínuo.

Os secadores rotativos são constituídos por um tambor cilíndrico, onde o produto com alto teor de humidade é inserido numa das extremidades e percorre todo o equipamento, no sentido axial e radial provocado pelas pás que estão presentes no interior do tambor. Dentro dele estão montados vários tipos de pás; de rebatimento, de avanço e de alto rendimento, que favorecem a permuta térmica entre os gases quentes e o material submetido à secagem. A secagem do produto pode ser feita em

contracorrente, quando o fluxo dos gases quentes tem sentido contrário à direção de avanço do material a secar, o que aumenta o rendimento térmico do processo, ou em co-corrente, caso em que o fluxo dos gases tem a mesma direção e sentido do material a secar. ⁽³²⁾

Na figura 2.5 está representado um secador rotativo.

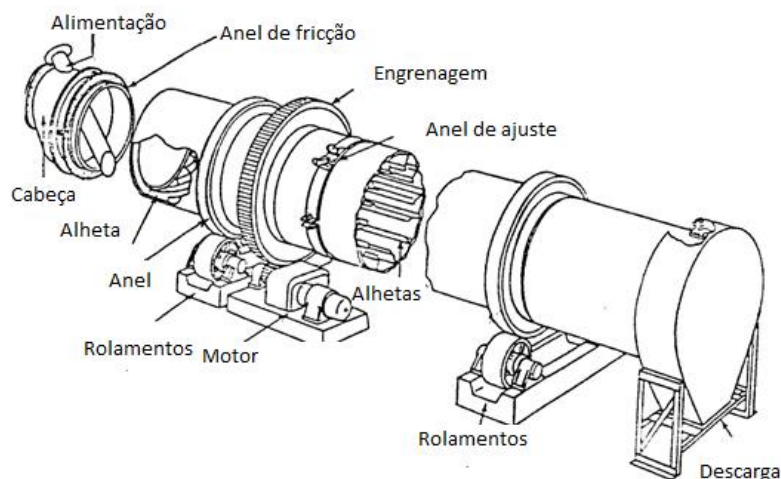


Figura 2.5- Ilustração de um secador de rotativo. ⁽³³⁾

Para secadores rotativos e em regime contínuo, o balanço de matéria geral é o que está representado na equação 2. ⁽³⁴⁾

$$G(y_{Bs2} - y_{Bs}) = -S'(X_4 - X_2) \quad \text{Equação 2}$$

A equação 2, representa o balanço mássico ao secador, em que:

- G é o caudal de ar seco (kg/dia);
- y_{Bs} e y_{Bs2} são as humidades específicas do ar;
- S' é o caudal do sólido seco (kg/dia);
- X_4 e X_2 é a humidade do sólido em base seca. ⁽³⁴⁾

No sentido de facilitar o processo de incineração, os resíduos provenientes do aterro devem ser submetidos a um processo de secagem para promover a redução da sua humidade de 52% para 12%.

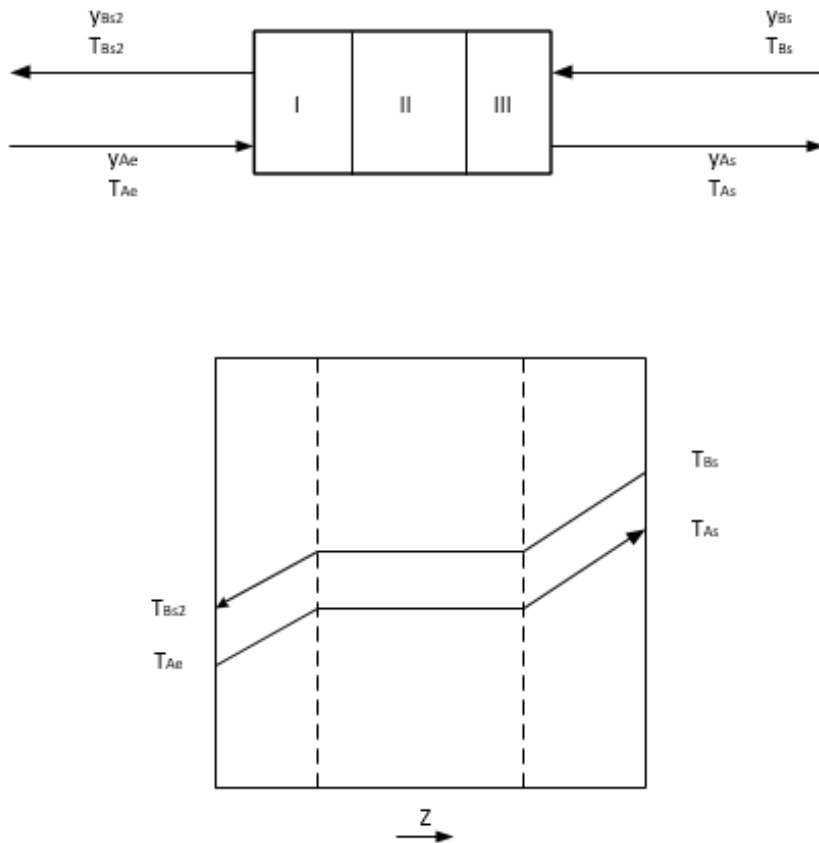


Figura 2.6-Esquema das três etapas dentro do secador, com o conseqüente perfil de temperaturas.⁽³⁴⁾

O esquema representado na figura 2.6 considera um secador adiabático, contínuo e com funcionamento em contracorrente. São distinguidas três zonas, em que a primeira e a última são responsáveis pelo aquecimento do sólido ocorrendo basicamente um fenómeno de transferência de calor e a zona intermédia é onde ocorre a secagem propriamente dita ocorrendo transferência de calor e de massa. Na zona I decorre o aumento da temperatura dos sólidos até à temperatura de saturação, na zona II ocorre a transferência da água presente no sólido para o gás e a zona III é responsável pelo aumento da temperatura do sólido.

O balanço energético, apresentado na equação 3 envolve as entalpias do ar e do sólido, assim como o calor trocado com o exterior.

$$Q + H_{Bs} + H_{Ae} = H_{Bs2} + H_{As} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

- H_B - Entalpia do ar (kJ/kg);
- H_A - Entalpia do sólido (kJ/kg);
- Q - Calor trocado com o exterior (kJ/kg).⁽³⁴⁾

Um dos passos mais importantes do dimensionamento do secador é determinar o comprimento do secador. Para isso, consideram-se os seguintes aspetos para simplificação de cálculos:

- Todo o calor transferido é efetuado por convecção;
- As áreas de transferência de calor e de massa são iguais;
- A remoção de humidade dá-se com o sólido à temperatura do termómetro húmido.

Assim sendo, pode-se considerar que o comprimento de secador é dado por:

$$z = 0.0175 \times G'^{0.84} \times c \times dx \ln \left(\frac{T_{Bs} - T_w}{T_{Bs2} - T_w} \right) \quad \text{Equação 4}$$

O diâmetro do secador é dado pela seguinte equação:

$$d = \left(\frac{4W_g}{\pi G'} \right)^{0.5} \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

- G' é o fluxo mássico do ar em $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;
- W_g é o caudal mássico do ar, em kg/h ;
- d é o diâmetro do secador, em m ;
- z é o comprimento do secador, em m ;
- c é o calor específico do ar, em $\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$;
- T_w é a temperatura húmida do ar, em $^\circ\text{C}$;
- T_B e a temperatura do ar, em $^\circ\text{C}$.⁽³⁵⁾

De acordo com a bibliografia G' deve estar compreendido entre os valores de 100 e 50000 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, o diâmetro do secador deve estar compreendido entre 10 a 25% do comprimento do secador, mas também não ser inferior a 30 cm, nem superior a 3 m. ⁽³⁵⁾

2.6.2. Trituração

As dimensões das partículas sólidas podem influenciar de forma significativa a combustão dos resíduos e, como tal, por vezes é necessário recorrer a equipamentos que diminuam os tamanhos das partículas.

A etapa da trituração dos resíduos de couro consiste em efetuar uma ação mecânica para que ocorra uma diminuição da dimensão dos resíduos, assim como a homogeneidade entre eles.

Existem três tipos de equipamentos utilizados para a trituração que são eleitos de acordo com as dimensões desejadas:

- Britadores: para partículas grossas (150mm -50 mm);

- Trituradores: para partículas médias (50mm-1 mm);
- Moinhos: Para partículas finas e muito finas (<1mm).^(30; 36)

Neste tipo de combustão, o combustível deve ter uma granulometria adequada ao tipo de queimador utilizado.

2.6.3. Gerador de vapor

O gerador de vapor utiliza os gases quentes provenientes da queima de um combustível para fornecer calor a água líquida de forma a promover a sua vaporização. A energia necessária para a transformação da água líquida saturada em vapor de água saturado pode ser quantificada a partir da equação 6.⁽³⁷⁾

$$E = m \times \Delta H \quad \text{Equação 6}$$

em que:

E – Energia necessária por unidade de tempo (W);

m – Caudal mássico da corrente de água (kg/s);

ΔH – Calor latente de vaporização da água líquida saturada à temperatura a que ocorre a mudança de fase (kJ/kg)

A transformação da energia térmica é realizada nos geradores de vapor. Estas unidades são construídas respeitando uma série de normas nacionais e internacionais, sendo equipadas com os seguintes componentes:

- Fornalha;
- Caldeira;
- Superaquecedor;
- Economizador;
- Aquecedor de ar.

A fornalha é o componente responsável pela mistura do combustível com o ar, realizando-se assim a combustão, onde são gerados gases quentes. Daqui resulta uma dada energia que será transferida para a água líquida que alimenta a caldeira, concebendo assim o vapor.⁽³⁸⁾

2.6.3.1. Fornalha

A queima dos resíduos de couro ocorre nas fornalhas, que são os elementos designados para converter a energia química em energia térmica. Conforme a qualidade e as características do combustível, pode-se recorrer a três tipos de fornalhas:

- Fornalha para queima em suspensão

Estas fornalhas têm uma aplicação mais abrangente, principalmente por permitirem a queima de óleo, carvão pulverizado ou mesmo gás natural.⁽²⁰⁾

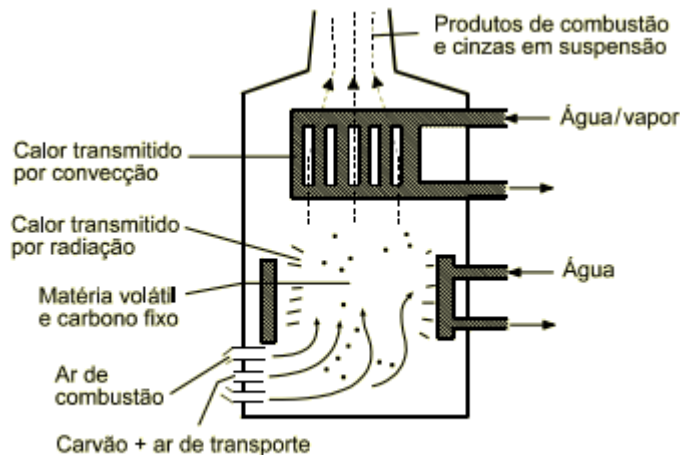


Figura 2.7- Esquema de uma caldeira com um sistema de combustão em suspensão.⁽³⁹⁾

- Fornalha para queima em grelha

Estas fornalhas são utilizadas para atenderem a caldeiras de pequeno e médio porte, com capacidades inferiores a 200 000 kg/h. Estas fornalhas têm a capacidade de se ajustar a vários combustíveis, o que as torna mais vantajosas, não requerendo uma composição rigorosa do combustível. Deve-se garantir uma granulometria homogênea e que a alimentação corresponda às oscilações da carga da instalação.

O suprimento de ar é assegurado por ventiladores que forçam o ar através do leito e do interior da câmara de combustão.

Este tipo de incineração implica a queima parcial do combustível e, por isso, é comum a presença de carbono não queimado entre as cinzas. O arraste de fuligem com os gases de combustão é outra preocupação pois sendo o arraste evitado, ou seja, a fuligem reintroduzida na câmara de combustão, a eficiência da caldeira aumenta.

Existem dois tipos de construção de fornalhas em grelha, a grelha fixa ou a grelha móvel, dependendo da capacidade da caldeira.⁽²⁰⁾

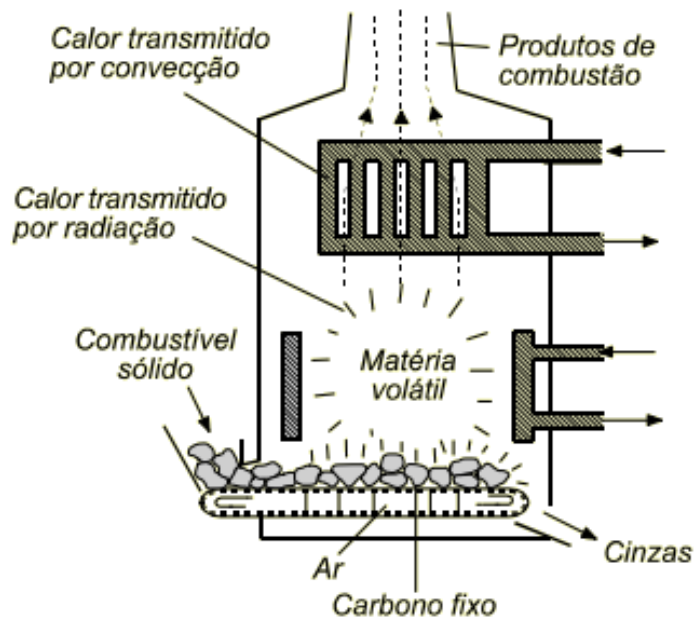


Figura 2.8- Esquema de uma caldeira com um sistema de combustão em grelha⁽³⁹⁾.

- Fornalha para queima em leito fluidizado.

As fornalhas de queima em grelha ou em suspensão necessitam de maiores investimentos, pois o combustível utilizado é de menor qualidade, o que provoca um maior teor de cinzas resultantes da combustão, necessitando assim de uma maior relação entre o ar e combustível. Este elevado teor tem impactos muito negativos para o meio ambiente e para a própria instalação.

Para combater os altos investimentos nessas fornalhas, pode-se optar por fornalhas de leito fluidizado.

Estas são conhecidas por funcionarem com combustíveis menos nobres, isto porque o combustível permanece em suspensão no leito, sob ação de uma corrente ascendente de ar, até que a combustão esteja completa.

Para que o leito se mantenha fluidizado e em agitação contínua, é injetado ar uniformemente e com velocidades compatíveis, permitindo que as fornalhas operem em temperaturas relativamente baixas, na ordem dos 800 a 950 °C.

Estas fornalhas proporcionam taxas de transferência de calor bastante acima das outras, devido ao facto da circulação contínua do leito. Como a temperatura de equilíbrio é baixa, é possível transferir essa energia para a água da caldeira por serpentinas instaladas diretamente no leito, obtendo-se elevadas taxas de evaporação. ⁽²⁰⁾

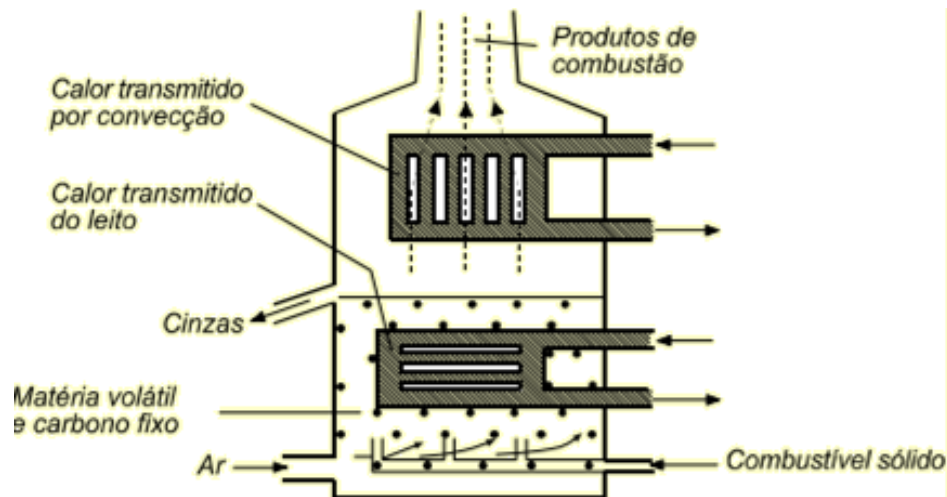


Figura 2.9- Esquema de uma caldeira com um sistema de combustão em leito fluidizado.⁽³⁹⁾

De forma a conseguir comparar os três tipos de queima, construiu-se a tabela 2.3. onde esta representadas as várias características destes três tipos de processos de combustão.

Tabela 2.3- Comparação das características dos três principais processos de combustão.⁽³⁹⁾

Característica	Processo de Combustão		
	Suspensão	Grelha	Leito fluidizado
Eficiência da combustão (%)	99	70-90	90-99
Eficiência térmica global (%)	35-45	25-35	40-55
Excesso de ar (%)	15-50	20-40	10-25
Granulometria do combustível (mm)	<0.5	12-20	8
Temperatura da operação (°C)	1400-1700	1400-1700	800-950
Emissões de NO_x	Alta	Alta	Baixa
Captura de SO_x (%)	-	-	80-90

Em resumo, optou-se pela utilização de uma fornalha de leito fluidizado, devido à baixa emissão de NO_x, à elevada eficiência de combustão e térmica.

Tendo em conta o tipo de fornalha escolhido, procedeu-se ao dimensionamento desta. Para isso começou-se por calcular a superfície da grelha.

$$A_g = \frac{\dot{m}_c}{N_c} \quad \text{Equação 7}$$

Em que:

- N_c é a taxa de carregamento ou de combustão, kg/(h m²);
- A_g é a área total da grelha, m²;
- \dot{m}_c é o caudal de combustível, kg/h;

Para além da área da grelha, deve-se calcular também a área livre da grelha. Este valor acaba por influenciar significativamente a taxa de carregamento, o combustível, a velocidade com comburente assim como outros fatores.

$$A_l = \frac{\dot{m}_c \times V_{ar}^t}{v \times 0.2} \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

- A_l é a superfície livre da grelha, isto é, a seção total de todos os espaços entre as barras que compõem a grelha, m²;
- V_{ar}^t é o volume teórico de ar necessário à queima de 1 kg de combustível, m³;
- v é a velocidade de escoamento do ar em m/s;

A partir da equação 9, é possível determinar um dos fatores em falta, quer para o rendimento quer para o calor necessário (Q_u).

$$\dot{m}_c = \frac{Q_u}{\eta \times PCI} \quad \text{Equação 9}$$

Na equação 10 é calculada a energia libertada pelo caudal de combustível em função do poder calorífico inferior. Na equação 11 é calculado o volume da câmara de combustão.

$$Q = \dot{m}_c PCI \quad \text{Equação 10}$$

$$V_{cc} = \frac{\dot{m}_c PCI}{K} \quad \text{Equação 11}$$

Em que:

- V_{cc} é o volume da câmara de combustão, m³,
- PCI é a poder calorífico inferior do combustível, kJ/kg;
- K é a carga térmica volumétrica, kJ/(s m³).

É importante conhecer a altura da câmara de combustão, para isso recorre-se à equação 12.

$$h_{cc} = \frac{4V_{cc}}{\pi d_{cc}} \quad \text{Equação 12}$$

Em que

- h_{cc} é a altura da câmara de combustão, m;
- d_{cc} é o diâmetro da câmara de combustão, m.

No que toca aos balanços mássicos da fornalha, é primordial saber qual a quantidade de combustível consumido, que pode ser obtido a partir de um balanço mássico do que sai do triturador, este é alimentado pelo caudal mássico proveniente do secador e por outro caudal oriundo diretamente da indústria.

$$\dot{m}_{combustível} = \dot{m}_{aterro} + \dot{m}_{secador} \quad \text{Equação 13}$$

A energia necessária para aquecer o combustível é um dos fatores importantes para calcular o caudal de combustível. Na equação 14 está representado o cálculo da quantidade de calor necessário para aquecimento do ar no gradiente térmico desejado.

$$Q_u = \dot{m}_{ar} \times c_p \times \Delta T \quad \text{Equação 14}$$

- Q_u é a energia necessária para aquecer o ar, kJ/h;
- c_p é o calor específico médio do ar, kJ/(kg°C);
- ΔT é o gradiente de temperaturas.

Para perceber o rendimento das fornalhas recorre-se à equação 15.

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_d} \quad \text{Equação 15}$$

No entanto, para o dimensionamento da fornalha é importante efetuar os balanços mássicos e energéticos do sistema. [\(40-42\)](#)

Na equação 16, está representado o balanço mássico global, onde é essencial perceber quais são os produtos e os reagentes da reação de combustão.

$$m_{combustível} + m_{ar} = m_{cinzas} + m_{gases} \quad \text{Equação 16}$$

Inicialmente, conhece-se o caudal de combustível e sabe-se que a quantidade de cinzas será composta essencialmente por matéria mineral. Pela caracterização dos resíduos, sabe-se que existe cerca de 9% de matéria-mineral no combustível, então pode-se concluir que o caudal de cinzas será igual a 9% do caudal de combustível.

A quantidade de ar necessário para que a queima se realize é obtida a partir da construção da tabela estequiométrica. Estas tabelas, representadas na figura 2.10, baseiam-se em descrever os constituintes do combustível, e pelas reações entre o combustível e o ar é possível obter a quantidade total de ar, a quantidade de gases de

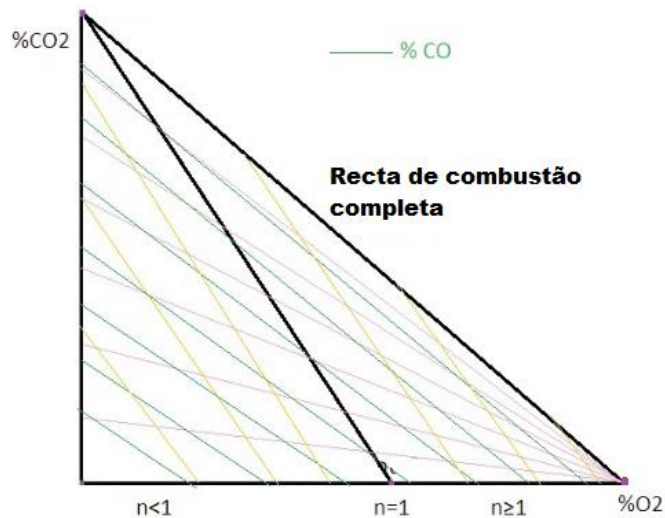


Figura 2.11-Esquema representativo do diagrama de Ostwald (43)

A temperatura de combustão é obtida a partir da equação:

$$\sum Q_s = \sum Q_i \quad \text{Equação 17}$$

$$\sum mcp\Delta T = \sum mPCI \quad \text{Equação 18}$$

Como a capacidade calorífica varia consoante a temperatura, arbitra-se a temperatura de combustão, até que o Q_s seja da mesma ordem de grandeza que o Q_i .

2.6.3.2. Caldeira

É na caldeira que ocorre a mudança de fase da água do estado líquido para o vapor. Esta transformação só é possível devido à energia por radiação e por convecção dos gases de exaustão(44). A água no estado líquido circula no interior ou exterior das tubagens que, quando estão em contacto com calor dos gases, provoca a vaporização ou o aquecimento da água. A diferença de densidades faz com que o vapor se separe da água e abandone as tubagens para ser acumulado num tambor. Daqui, o vapor é encaminhado para o superaquecedor.(20)

Podem existir três tipos de geradores de vapor, em relação à pressão de trabalho, podendo ser de baixa (até 10 kgf/cm²), média (11 a 40 kgf/cm²) e alta (40 kgf/cm²) pressão.

Os geradores de vapor diferenciam-se quanto à posição dos gases quentes, sendo flamotubulares, aquatubulares ou mistos, e quanto à posição dos tubos, podendo ser verticais, horizontais ou inclinados.

Nas caldeiras aquatubulares a água e o vapor circulam no interior dos tubos, enquanto os gases provenientes da combustão circulam no exterior dos tubos. Estas caldeiras são normalmente utilizadas para a produção de elevadas quantidades de vapor. Estas caldeiras não apresentam limitações de pressão nem temperatura, e necessitam de um menor volume de água em comparação á quantidade de vapor produzido (em paralelo com as caldeiras de tubos de fumo).

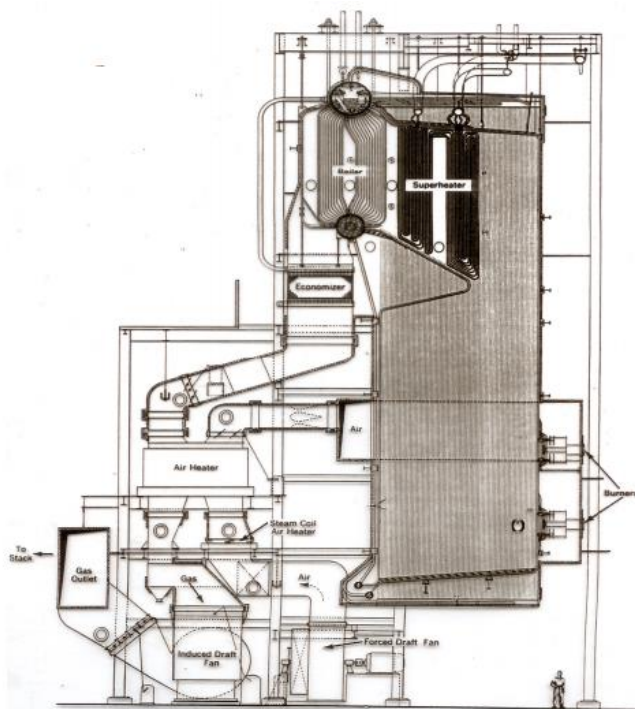


Figura 2.12- Esquema ilustrativo de uma caldeira aquatubular. ⁽⁴⁵⁾

No tipo de caldeiras ilustrado na figura 2.12 pode existir dois tipos de circulação: natural e forçada. No natural, a circulação da água na caldeira depende inteiramente da diferença de densidades, provocada pela temperatura, em que a água fria circula no sentido descendente e a quente no sentido ascendente. A circulação forçada é caracterizada pela utilização de uma eletrobomba que força a circulação da água. Neste tipo de caldeira, os tubos apresentam menor diâmetro que no caso da circulação natural e, conseqüentemente, maiores velocidades de circulação e vaporização da água.⁽¹⁷⁾ A transferência de calor dá-se de duas formas: por radiação e por convecção.

Nas caldeiras tubos de fumo, os gases de combustão circulam pelo interior dos tubos, enquanto a água e o vapor circulam pelo exterior dos tubos. Estas caldeiras funcionam a pressões inferiores a 20 bar, no entanto têm como vantagem serem mais baratas que as aquatubulares.

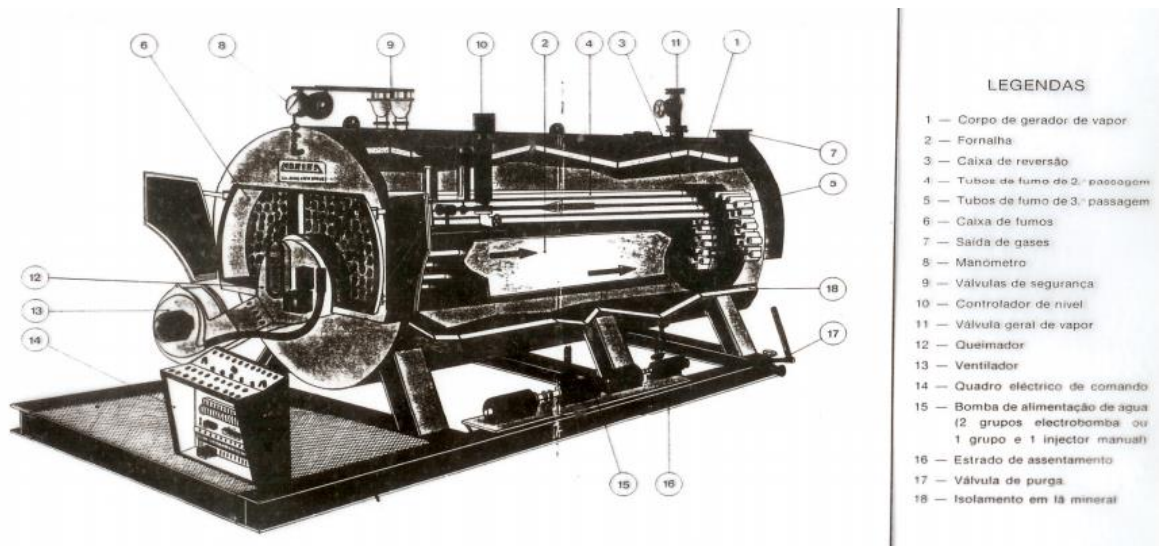


Figura 2.13- Esquema ilustrativo de uma caldeira de tubos de fumo. ⁽⁴⁵⁾

A caldeira ilustrada na figura 2.13 utiliza preferencialmente combustíveis líquidos ou gasosos, por se tornar difícil a instalação de grelhas. Os gases de combustão circulam por dentro dos tubos, em duas ou mais passagens, na direção da chaminé, por onde são lançados para o meio ambiente. Os tubos podem ser colocados na horizontal ou na vertical.

As caldeiras horizontais de tubos de fumos podem ainda ser de chama direta, se os gases de combustão ao sair da fornalha seguem sem voltar sobre si mesmos até à chaminé, ou de chama invertida se os gases de combustão têm que voltar sobre si mesmos no seu caminho para a chaminé. As caldeiras tubos de fumo horizontais de chama invertida são as que mais frequentemente se encontram instaladas na indústria. As caldeiras tubos de fumo são também usadas frequentemente como caldeiras de recuperação de turbinas a gás ou motores de combustão, onde os gases de exaustão destes equipamentos passam pela caldeira de forma a recuperar a sua energia térmica, quer pela forma de vapor ou água quente. ⁽¹⁷⁾

Tabela 2.4- Resumo das vantagens de desvantagens das diferentes caldeiras. ⁽³⁸⁾

	Tubos de fumos	Aquatubulares	Mistas
Vantagens	Custo de aquisição baixo	Alto rendimento térmico (15 a 150 ton/h)	Média produção de vapor 3 até 25 ton/h
	Exigem pouca espaço	Altas pressões de operação (90 a 100 kgf/cm ²)	Pressão de operação de 15 a 30 kgf/cm ²
	Reagem a aumentos instantâneos de vapor.	Relativa facilidade de inspeção	
		Relativa facilidade para instalação de economizador, superaquecedor e pré-aquecedor	
Desvantagens	Baixo rendimento térmico	Custo de aquisição alto	Não apresentam segurança como as aquatubulares
	Limitação de pressão de operação (15 a 20 kgf/cm ²)	Custo de manutenção alto	
	Baixa taxa de vaporização (10 ton/h)	Exigem muita alvenaria	
	Dificuldades na instalação de um economizador, superaquecedor e pré-aquecedor	Elevado tempo para o arranque e para a paragem do equipamento.	

O vapor fornecido aos equipamentos consumidores deve reunir algumas características que asseguram uma boa qualidade do ar:

- Quantidade e pressão adequadas;
- Seco;
- Isento de ar;
- Limpo.

O vapor presente nos tubos contém sempre um pouco de água líquida, proveniente da água da caldeira e da condensação que ocorre nas linhas de distribuição. A existência desta água no estado líquido provoca uma maior resistência térmica nos permutadores de calor. ⁽³⁸⁾

2.6.3.3. Equipamentos para recuperação energética

Nas caldeiras mais eficientes, são utilizados equipamentos que visam o aproveitamento do calor dos gases de exaustão para aumentar a temperatura do vapor e para aquecimento da água e do ar que entram na caldeira. Para esta reutilização são utilizados permutadores de calor.

Superaquecedor

Os superaquecedores têm com função aumentar a temperatura do vapor utilizando, para isso, a energia disponível nos gases de combustão. A localização dos superaquecedores é escolhida tendo a conta a temperatura desejada para o vapor e, para isso, existem dois tipos de superaquecedores: o convectivo e o radiante. Os superaquecedores convectivos estão alojados no trajeto dos gases, existindo trocas de calor por convecção e radiação. Os radiantes são alojados no cimo da câmara de combustão, onde é predominante a permuta de calor por radiação. ⁽²⁰⁾

Economizador

Os economizadores são permutadores de calor que aumentam a temperatura da água que alimenta a caldeira porque funcionam como permutadores de calor, onde é aproveitada a temperatura dos gases de combustão. São normalmente instalados depois dos superaquecedores e antes dos aquecedores de ar. A sua construção é efetuada para que haja um maior aproveitamento energético. A presença do economizador é vantajosa, pois aumenta o rendimento do gerador de vapor. No entanto, é sempre necessária a avaliação económica da rentabilidade deste tipo de equipamento, o que por vezes, para pequenas instalações, não é vantajoso. ⁽²⁰⁾

Aquecedor de ar

Os aquecedores de ar, como o próprio nome indica, servem para aumentar a temperatura do ar que é utilizado na combustão. Estão normalmente localizados no fim do trajeto percorrido pelos gases de combustão. Este tipo de reaproveitamento traz várias vantagens, tais como: reduz o consumo de combustível, aumenta a rapidez de combustão e ajuda o processo de queima a ser mais uniforme e estável. ⁽²⁰⁾

2.7. Bombas

Na incineração dos resíduos de couro, será transferida energia térmica suficiente para que a água líquida seja convertida em vapor sobreaquecido. Este vapor será utilizado para a produção de energia elétrica, através da passagem deste por uma turbina. Após a produção de energia, o vapor sobreaquecido passa a líquido saturado, que de seguida é encaminhado para um condensador, onde ocorre a condensação de todo o vapor em água (à pressão de cerca de 10 kPa).

Para um maior aproveitamento de matéria, a água que é condensada será totalmente reintroduzida no sistema de produção de vapor, mais concretamente na caldeira. Esta recirculação só é possível com a utilização de bombas, que vão deslocar a água do condensador da central de produção de energia elétrica até à caldeira.

As bombas são aparelhos que cedem parte da potência de uma fonte motora a um fluido com o intuito de provocar o transporte do fluido, quer por um aumento da velocidade, da pressão ou de ambos.

As classificações das bombas variam segundo dois principais modelos: volumétricas ou dinâmicas. Esta distinção é caracterizada pela geometria do elemento que adiciona potência ao sistema. Na figura seguinte, encontra-se resumido os tipos de classificação possíveis para as bombas. [\(46; 47\)](#)



Figura 2.14- Representação esquemática dos tipos de bombas. [\(47\)](#)

Nas bombas volumétricas, a energia transportada para o fluido já se encontra sob a forma de pressão. Esta é dada pela atividade de um constituinte mecânico da bomba, que força o líquido a exercer o mesmo movimento ao qual ele está programado. Existem dois modelos principais: as rotativas e as alternativas. As rotativas são adequadas para pressões altas e caudais baixos, em sistemas de bombeamento convencional e sistemas de lubrificação. Já no que toca às bombas alternativas, estas também possuem como característica as altas pressões e baixos caudais. No entanto, as últimas são mais adequadas para sistemas de controlo com precisão, como é o caso do sistema de alimentação de caldeiras, podendo ser também utilizadas em sistemas de bombeamento convencional.

Nas bombas dinâmicas, a movimentação do fluido é dada por forças acrescentadas a sua própria massa. Estas bombas são também consideradas de rotativas, no entanto diferem por serem constituídas por um ou mais impulsores com pás, semelhantes a turbinas.

Dentro das bombas dinâmicas, existem diferentes tipos de bombas, que se diferenciam principalmente nas características da pressão e caudal, influenciando a aplicação. Em resumo, pode-se dizer que as bombas regenerativas são adequadas para altas pressões e baixos caudais, podendo ser aplicadas em pequenos reservatórios. As bombas centrífugas aguentam altos caudais e altas pressões. Estas são normalmente utilizadas na indústria em sistemas de refrigeração de grande porte e em reservatórios de elevada capacidade. As de fluxo axial são utilizadas para caudais elevados e pressões baixas, aplicando-se normalmente a sistemas de rega. Já as bombas de fluxo misto são caracterizadas por trabalharem com pressões e caudais moderados, sendo utilizadas em abastecimento de reservatórios, circuitos de água e rega. [\(46; 47\)](#)

Para a instalação em causa, em que o caudal e a pressão são elevados, é aconselhado utilizar as bombas dinâmicas centrífugas. Atualmente, estas são das bombas mais utilizadas em todo o mundo. Segundo uma das maiores empresas fabricantes de bombas, a Grundfos®, as bombas centrífugas destinam-se principalmente para estes fins:

- Os circuladores são utilizados para fazer circular a água em sistemas fechados que produzem calor, ar condicionado e água quente;
- Os sistemas de pressurização aumentam a pressão da água fria no sistema, e são utilizados como bombas de condensados para caldeiras a vapor;
- Bombas para abastecimento de água são normalmente utilizadas para fornecer água a partir de furos, existindo versões para instalação subterrânea ou à superfície;

- Algumas bombas centrífugas são utilizadas exclusivamente para fins industriais ou para aplicações de águas residuais. (48)

Em 1689, o físico Denis Papin inventou a bomba centrífuga com o seguinte princípio de funcionamento: o líquido é conduzido para o núcleo do impulsor e distribuído, através da força centrífuga, para a periferia deste.

Para além das variadas aplicações a que esta bomba pode ser sujeita, outro fator que está na base da sua forte utilização em todo o mundo é que a sua construção é simples, pouco dispendiosa e robusta. (46-48)

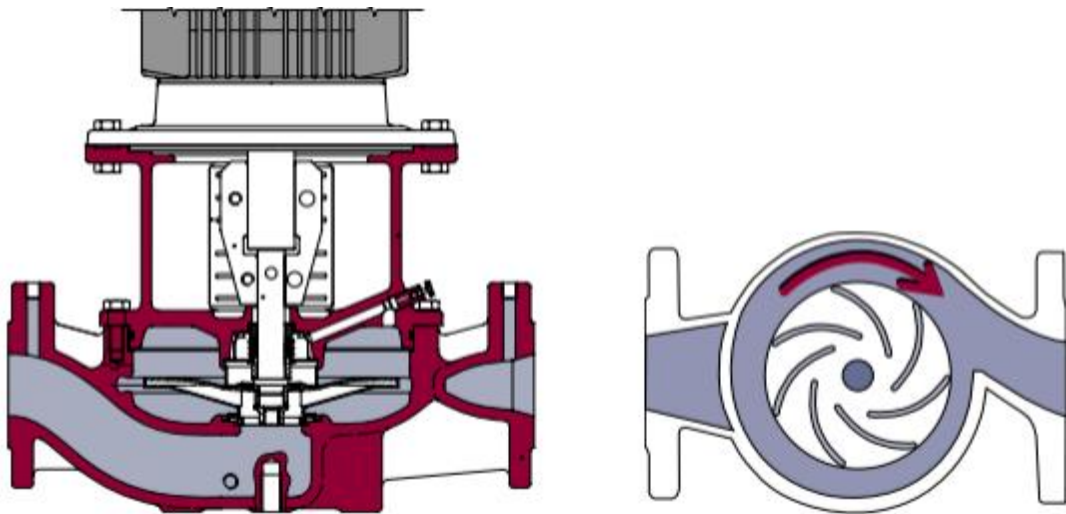


Figura 2.15-Ilustração de uma bomba centrífuga em duas vistas, de cima e frontal. (48)

Para o correto dimensionamento das bombas é necessário ter em atenção alguns aspetos, tal como o número de Reynolds, a velocidade do fluido e as perdas nas tubagens.

Inicialmente calcula-se o número de Reynolds, a partir da seguinte equação:

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad \text{Equação 19}$$

Em que:

- D_h diâmetro equivalente;
- v é a velocidade do fluido, em m/s;
- ρ é a densidade do fluido, em kg/m^3 ;
- μ é a viscosidade do fluido, em Pa.s.

Consoante o resultado do número de Reynolds pode-se recorrer à equação 20 ou 21 para calcular a velocidade do fluido, a primeira é para regime laminar e a segunda para regime turbulento.

$$v = v_{max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad \text{Equação 20}$$

$$v = v_{max} \left[\left(\frac{R-r}{R} \right)^{1/7} \right] \quad \text{Equação 21}$$

Na equação 22, encontra-se representado o cálculo do balanço de energia ao fluido em dois pontos com alturas diferentes.

$$H_2 - H_1 + \frac{1}{2\alpha} (v_2^2 - v_1^2) + g(z_2 - z_1) = Q + W \quad \text{Equação 22}$$

O balanço de energia mecânica:

$$\frac{P_1}{\rho} + gz_1 + \frac{1}{2\alpha} v_1^2 + W = \frac{P_2}{\rho} + gz_2 + \frac{1}{2\alpha} v_2^2 + \sum F_{1-2} \quad \text{Equação 23}$$

$$\frac{\Delta P_f}{\rho} = \sum F = 2f \frac{L}{D} v^2 \quad \text{Equação 24}$$

Para um correto dimensionamento das bombas, é essencial calcular o trabalho que é efetuado pela bomba, e com este valor é que possível pedir um orçamento. [\(49\)](#)

3. Projeto

No processo de produção do calçado a etapa de corte, que antecede a costura, gera resíduos de couro. A maior parte destes resíduos contém crômio sendo, por isso, considerados resíduos perigosos. Na ausência de um processo de tratamento adequado e sustentável para este tipo de resíduos, é obrigatória a sua deposição em aterro próprio para tal. O aterro de Felgueiras recebe cerca de 18 ton/dia de resíduos de couro da indústria do calçado. Neste projeto procura-se dar resposta à possibilidade de promover a queima/incineração destes resíduos para produção de vapor e consequente produção de energia elétrica, como alternativa à deposição em aterro. Estabelece-se como base de cálculo de partida o valor de 30 ton/dia de resíduos de couro alimentados ao sistema de queima/incineração, sendo constituídos por 18 ton/dia provenientes diretamente da indústria e o restante proveniente dos resíduos de couro já depositados em aterro após redução para uma humidade idêntica à dos resíduos originais.

A avaliação das características dos resíduos de couro foi efetuada pelo CIETI, através da análise de amostras fornecidas pelo aterro. A caracterização dos resíduos de couro provenientes diretamente da indústria, podem ser observados na Tabela 3.1 [\(50: 51\)](#)

Tabela 3.1- Caracterização dos resíduos de couro provenientes diretamente da indústria. [\(50: 51\)](#)

Características	Resíduos de couro acabado
Teor em sólidos (%)	87,3
Humidade (%)	12,7
Matéria mineral (%)	9,1
Matéria orgânica (%)	90,9
Poder calorífico superior (cal/g)	4.899
Teor em óxido de crômio (%)	2,35

O teor de água presente num material influencia negativamente o poder calorífico envolvido. Esta humidade é libertada na fase inicial da combustão, sendo necessária uma quantidade de energia elevada para que ocorra a evaporação, quantidade essa proveniente da libertação de calor das reações de combustão e que, sendo utilizada para a evaporação da água, contribui para uma diminuição da temperatura dos gases de combustão.

No entanto, a análise elementar das matérias-primas, é essencial para que se conheça os reagentes da combustão. E assim determinar com mais exatidão os produtos

da combustão. Na **Tabela 3.2**, estão representados os valores da análise elementar a resíduos de couro.

Tabela 3.2- Análise elementar das matérias-primas realizada pelo LNEG. (50: 51)

Amostra	Carbono (% massa)	Hidrogénio (% massa)	Azoto (% massa)
Bagaço de azeitona	52,5	7,3	1,5
Raspa grossa de cortiça	44,3	6,0	0,7
Raspa fina de cortiça	48,1	6,3	0,5
Pó de cortiça	59,3	7,7	1,0
Raspa de lixa	48,5	7,3	9,6
Raspa wet-blue	31,9	6,5	11,5
Resíduos de couro acabado	43,2	7,2	11,4

Os resíduos de couro que provêm diretamente da indústria de calçado têm um valor médio de humidade de cerca de 12%. No entanto, por uma questão estratégica e para aumentar a quantidade de resíduos a tratar no sentido de proporcionar um maior potencial para a produção de vapor, decidiu-se considerar também a possibilidade de tratar os resíduos já depositados em aterro que têm um valor de humidade compreendido entre 40 a 60% conforme avaliação pelo CIETI, o que se apresenta na Tabela 3.3.

Para que a reação de combustão seja o mais rentável possível, é necessário que todas as resíduos de couro extraídas do aterro sejam submetidas a um processo de secagem no sentido de reduzir o teor de água. (50: 51)

Tabela 3.3- Resultados dos valores das resíduos de couro acabado que provêm do aterro. (50: 51)

Amostras	Humidade (% m/m)	Matéria orgânica (base seca) (% m/m)	Teor de Óxido de crómio (base seca) (% m/m)	Poder calorífico superior (kJ/kg)
Amostras de 2002	60,01	89,61	1,5	7.684
Amostras de 2003	52,52	72,21	0,2	10.234
Amostras de 2005	50,40	77,90	0,3	12.665
Amostras de 2006	47,32	77,27	0,3	11.144
Amostras de 2007	48,25	90,57	1,7	12.411
Amostras de 2008	53,15	91,68	1,0	9.259
Valores Médios	51,94	83,21	0,83	10.566

Assumindo como aceitável o valor de humidade dos resíduos de couro provenientes diretamente da indústria (12%), conclui-se que a humidade média dos resíduos provenientes do aterro, 52%, deve ser reduzida para 12%.^(50: 51)

3.1. Instalação

Neste subcapítulo encontram-se representados esquemas que ajudam a perceber o funcionamento da instalação, tais como o diagrama do processo e o diagrama de instrumentação e controle. Está também ilustrado o *layout* da instalação, com o intuito de proporcionar uma noção global da estrutura da central de incineração dos resíduos de couro.

3.1.1. Diagrama do processo

Para uma melhor compreensão do sistema de secagem e incineração, elaborou-se um diagrama do processo, em que estão representados os equipamentos essenciais e as correntes de entrada e saída de cada equipamento.

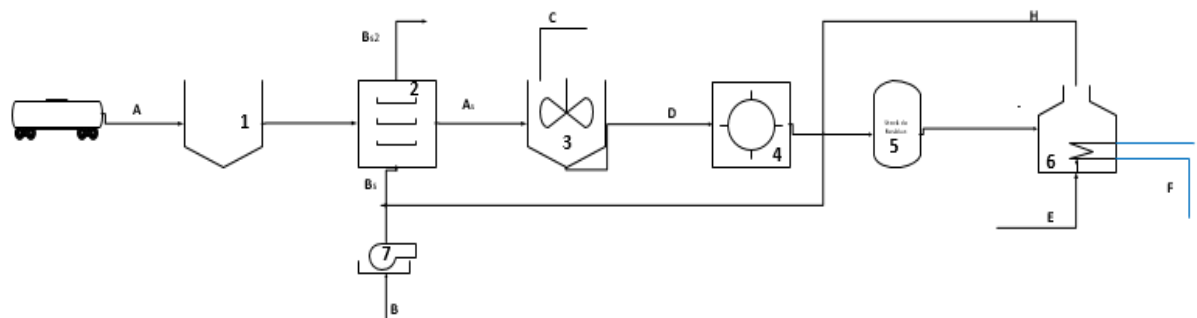


Figura 3.1- Diagrama do processo, com todas as correntes representadas.

O diagrama exposto na Figura 3.1 representa o processo a que os resíduos de couro estão sujeitos. Como já referido em capítulos anteriores, será retirado diariamente cerca de 22 ton de resíduos de couro do aterro que serão submetidos a um processo de secagem, após o qual terão uma massa de 12 ton, antes de misturados com os resíduos de couro provenientes diretamente da indústria perfazendo 30 ton/dia.

A quantidade diária retirada do aterro será transportada para o centro de incineração e colocada num depósito aberto (1, Figura 3.1), onde existe um pequeno stock para variações esporádicas de carga. De forma contínua, ao longo do dia, vão ser retiradas cargas para sofrer o processo de secagem (A, Figura 3.1). Esta massa de resíduos de couro, A (Figura 3.1) encontra-se à temperatura média ambiente (21°C) e tem uma humidade de cerca de 52%. No entanto, consoante a estação do ano e as condições

de impermeabilização do aterro, este valor pode variar. O caudal A (Figura 3.1) passa no secador (2, Figura 3.1) para reduzir o teor de água por contacto com ar aquecido, B_s. O secador (2, Figura 3.1) funciona em regime contínuo, por aquecimento direto e as correntes são posicionadas em contracorrente para melhorar a eficiência. O caudal de ar utilizado para a secagem, B_s, é composto por ar (B, Figura 3.1) e por gases de exaustão (H, Figura 3.1) sendo B ar ambiente à temperatura de 12,5°C, que é aquecido até 160 °C, aquecimento executado por queimador a óleo. Após o aquecimento, juntam-se as correntes B e H, esta proveniente dos gases de combustão. Estes, à saída da caldeira, encontram-se a temperaturas mais elevadas, mas, ao longo do percurso, perdem calor e atingem aproximadamente 160°C. No secador, a humidade dos resíduos de couro é reduzida para 12%, e estes saem do mesmo com uma temperatura de 43°C, que se considerou igual à temperatura húmida do ar por se admitir secagem adiabática. A corrente de ar, B_s, sai com uma temperatura de 45°C e humidade relativa de 90%.

Depois de seco, o couro é alimentado a um depósito com alguma agitação no qual é misturado com os resíduos de couro provenientes diretamente da indústria, de forma que ambas as correntes formem uma nova corrente devidamente homogeneizada (D, Figura 3.1). De seguida, a corrente D é enviada descontinuamente para o triturador. Este equipamento procederá à diminuição da granulometria dos resíduos de couro até aproximadamente 15 mm.

Após a trituração, o resíduo vai ser depositado num silo, que sempre que necessário enviará o combustível para a caldeira (6). Neste equipamento, por introdução de caudal de ar necessário, dá-se a combustão formando cinzas, gases quentes cuja energia térmica será fornecida a uma corrente de água (F) para provocar a vaporização desta, formando uma corrente de vapor (G), a 40 bar e 450°C.

3.1.2. Diagrama de instrumentação e controlo

Existem equipamentos que, aquando a instalação no processo fabril, vão necessitar de um maior controlo operacional a nível da temperatura, dos caudais e do teor de humidade.

Para que haja maior precisão do controlo estabelecido, optou-se por efetuar um estudo mais intensivo aos dois principais equipamentos, que são o secador e a caldeira.

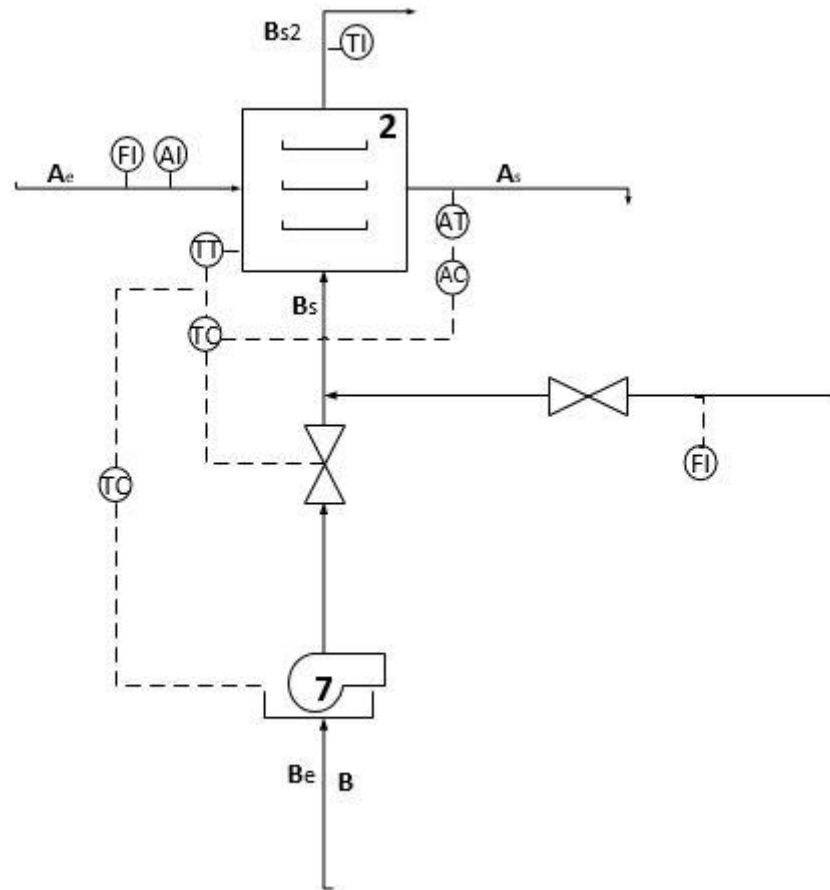


Figura 3.2- Representação do diagrama PID do secador.

O secador é um dos equipamentos mais importantes do processo, e como tal, requer que haja um controlo do equipamento e das correntes que o atravessam, tal como está ilustrado na Figura 3.2. Para isso, recorreu-se à instrumentação e controlo, implementado controladores, indicadores e transmissores nas correntes. Considerou-se a necessidade de indicadores de humidade e caudal na corrente inicial, para saber quais as condições em cada momento, sabendo que estas duas variáveis não vão sofrer muitas alterações não há necessidade de ter controladores, mas sim só indicadores para confirmação de valores. O mesmo acontece com a corrente de ar que sai do secador, não há nenhuma vantagem em controlar esta corrente. Por isso só é implementado um indicador de temperatura para conhecer o valor de saída. Também, no que respeita ao caudal dos gases de exaustão apenas se instala um indicador do caudal.

Uma vez que o secador e a corrente de saída estão bastante interligados é essencial focar o controlo nestes dois pontos, efetuando uma manipulação em cascata. No secador é efetuada uma leitura de temperatura a partir de um transmissor de temperatura, que transmite a informação a um controlador de temperatura. Neste sistema

o transmissor irá transmitir a informação a dois controladores de temperatura, um irá atuar diretamente com o caudal de combustível que entra no queimador, para aumentar ou diminuir a temperatura da chama, o que influencia a temperatura do ar que vai entrar no secador, corrente B_s. O outro controlador de temperatura vai receber a informação do transmissor, mas também de um controlador de humidade, e convertendo a informação e tendo em conta o que é necessário vai atuar na regulação do caudal de gases por manipulação da válvula.

Na corrente de saída de resíduos, A_s, é controlado o teor de humidade, a partir de um transmissor de humidade que vai transmitir a informação a um controlador de informação e este passa a informação para o controlador de temperatura que atua sobre a válvula como já foi referido.

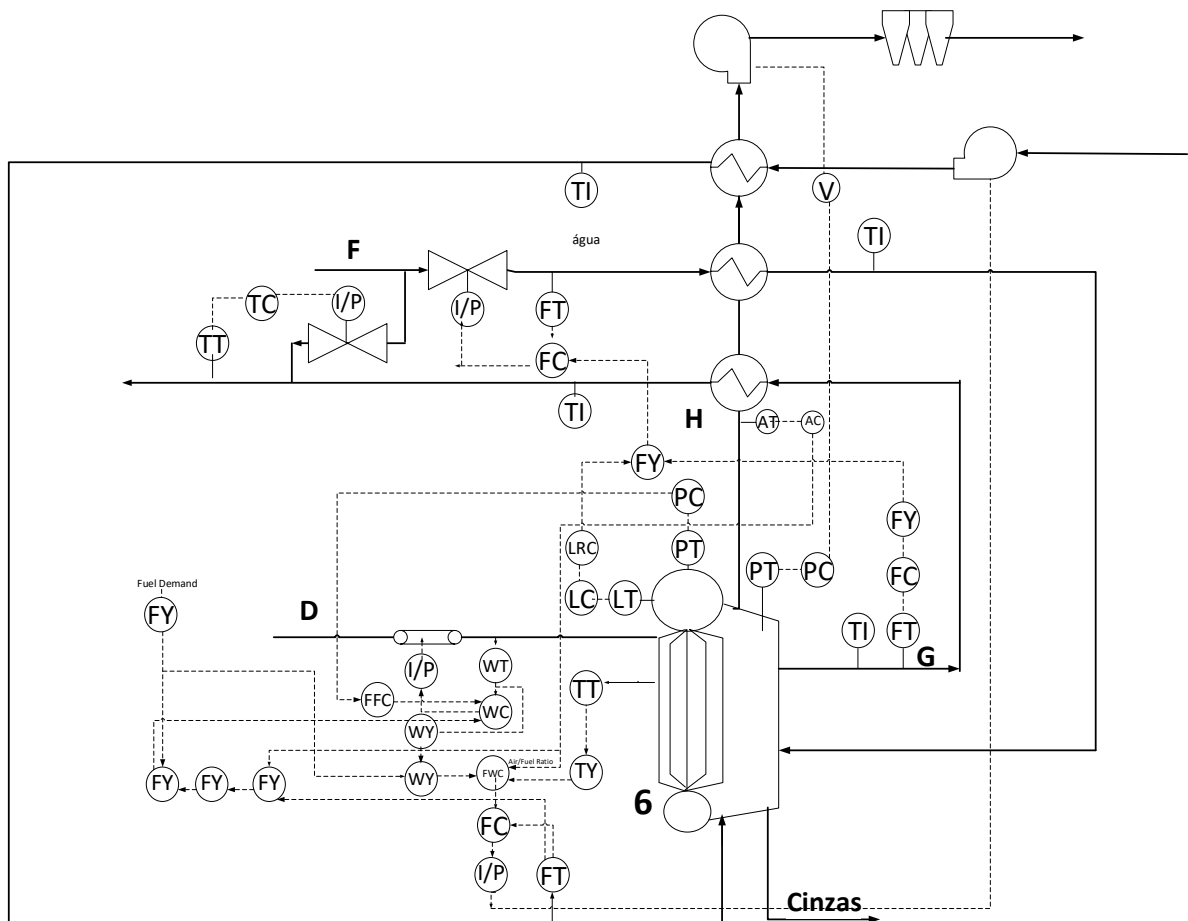


Figura 3.3- Representação do diagrama PID da caldeira.

Na Figura 3.3, está ilustrado o sistema de controlo PID da caldeira, de forma mais exaustiva.

A quantidade de combustível inserido na fornalha, é controlada por um transmissor de caudal, que fornece informação a um controlador de caudal, que por sua vez vai transmitir a informação a um conversor de sinal, e este é que vai atuar sobre o tapete. A

informação do transmissor é também enviada para um manipulador de caudal, que vai ser enviada a informação para outro manipulador de caudal, que calcula a informação vinda do caudal de combustível e do caudal de resíduos, esta informação vai ser enviada para o FWC, que vai atuar sobre o controlador de caudal de ar. O controlo sobre o caudal de combustível auxiliar e o caudal de combustível sólido existe um controlo em série, que junta a informação de ambos os caudais, e calcula a qual a quantidade de cada é que deve entrar. A análise da concentração dos gases é transmitida para o controlador, que vai passar a informação para o FWC e para o manipulador de caudal, que vai calcular a informação, passando por vários manipuladores e vão juntar a informação no controlador de caudal de combustível. Este controlador, vai receber informação também do controlador de pressão da caldeira, que vai converter informação no FFC e vai ser somado no WC.

O controlo de caudal da corrente de ar, corresponde a existência de um transmissor de caudal, que vai passar a informação para um controlador de caudal, que por sua vez vai receber também informação do FWC, e a informação é convertida atuando sobre o ventilador que insere o ar no sistema.

A temperatura da caldeira é lida pelo transmissor de temperatura, de seguida é calculada e a informação é enviada para o FWC. O ebulidor para além do controlo de pressão, tem um controlador de nível. A informação de controlador de nível, vai ser intercetada com o caudal de vapor sobreaquecido e vai atuar sobre o caudal de água de entrada, através do controlo em cascata.

A pressão da fornalha, é transmitida para um controlador, de seguida a informação vai ser transmitida para um variador de velocidade, que vai ter efeito no ventilador de extração de gases.

A corrente de vapor tem uma válvula de atemperação, que vai regular a temperatura do vapor, para isso é retirada água da alimentação. A quantidade de água retirada é manipulada tendo em conta a temperatura da corrente de vapor.

3.1.3. *Layout* da instalação

Na figura seguinte encontra-se o *layout* do centro de incineração. Optou-se por idealizar uma pequena fábrica que se divide em três principais zonas: o armazém, o processo e os escritórios. A zona do armazém contém um pequeno entreposto onde ocorre o descarregamento dos camiões que transportam a matéria-prima. Esta possui uma área adequada à existência de um cais de carga/descarga e espaço para a circulação de um empilhador. A par do armazém, encontra-se toda a linha do processo

onde primeira etapa é logo o depósito para a matéria-prima, posicionado por conveniência com o armazém.

Para além disto, existe uma zona com dois escritórios, duas casas de banho e uma sala de reunião.

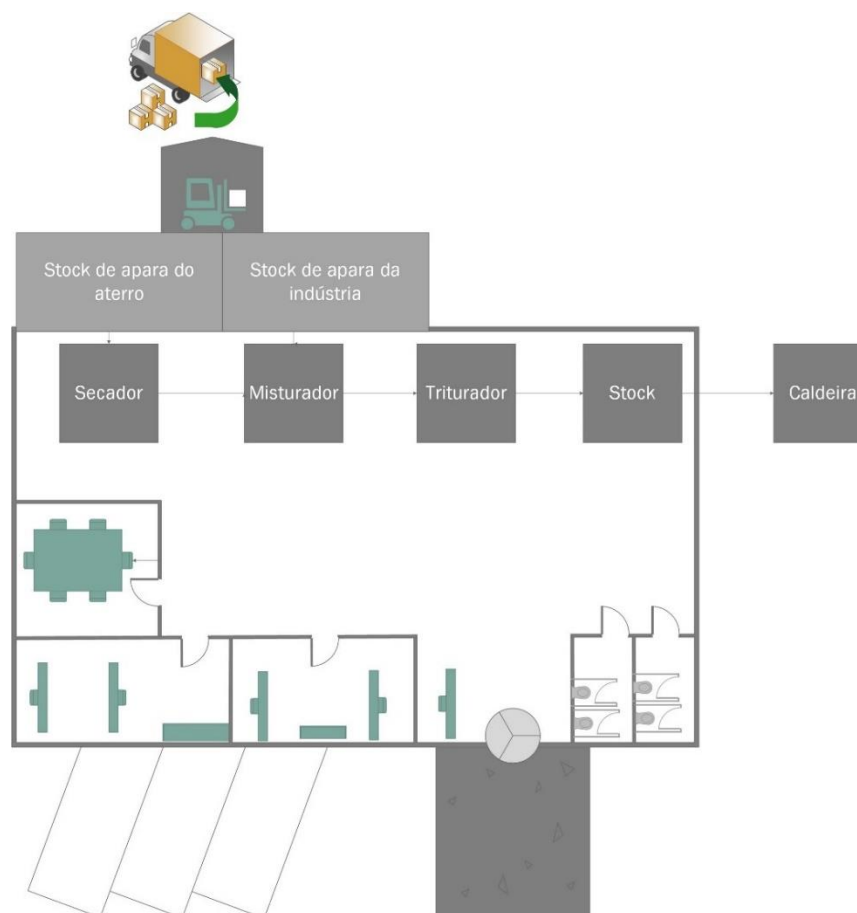


Figura 3.4- Representação do *layout* da instalação.

3.2. Balanços de materiais e energéticos

3.2.1. Secador

A partir das equações referidas no capítulo 2, calculou-se os valores essenciais dos balanços mássicos, conforme anexo A.

A corrente de couro seco é igual na entrada e na saída. Como se conhece o caudal final e a humidade determinou-se o caudal mássico de couro seco obtendo 10,56 ton/dia. Sabendo o caudal de couro seco e a humidade dos resíduos de couro provenientes do aterro, 52%, obteve-se um caudal extraído do aterro de 22 ton/dia.

Para que ocorra a diminuição do teor de humidade, é necessário que o sólido esteja em contacto com um gás a uma temperatura elevada. Neste caso, o gás utilizado é o ar cujo caudal mássico de ar seco é igual a 182,4 ton/dia ou 7,6 ton/h.

A necessidade energética para a secagem corresponde ao aquecimento do ar de secagem cujo cálculo, apresentado no Anexo A, conduziu a um valor de 27401 MkJ/dia, equivalente a uma potência de 317 kW.

3.2.2. Fornalha

Sabendo que o caudal mássico de resíduos sólidos à entrada é era de 30 ton/dia e que a matéria mineral é de 9%, pode-se considerar que o caudal de cinzas é equivalente ao caudal de matéria mineral. Como tal, após os cálculos apresentados no Anexo A, chegou-se à conclusão que o caudal de cinzas é de 2,40 ton/dia.

Sabendo a quantidade de ar necessária para a combustão completa estequiométrica, calculada no Anexo B, considerou-se que a combustão se dá com um excesso de ar de 15 %. Este valor de excesso de ar foi determinado a partir do diagrama de Ostwald, que pode ser observado no Anexo C.

Assim sendo, para que a reação seja completa e tenha um excesso de ar de 15%, o caudal de ar necessário a ser introduzido na câmara de combustão é 5,95 ton/dia.

Após conhecer o caudal de ar necessário, o caudal de cinzas e o caudal de combustível, facilmente se obtém o caudal de gases de combustão cujo valor é de 33,54 ton/dia.

3.3. Dimensionamento

Secador

Para o dimensionamento do secador foi necessário efetuar algumas premissas, sendo a principal a consideração de que o comprimento do secador corresponde apenas à zona de secagem que se considerou ser adiabática, tendo-se desprezado as zonas de aquecimento do sólido. Considerou-se ainda para o fluxo de ar o valor de 2500 kg/(m².h). ⁽³⁵⁾

Nesta base, chegou-se aos valores apresentados na Tabela 3.4, conforme anexo A.

Tabela 3.4- Valores obtidos para o diâmetro, comprimento e tempo de secagem.

Secador	D (m)	2
	Z (m)	24

Fornalha

Neste equipamento, tal como no anterior, para simplificação de cálculos, efetuaram-se algumas considerações, identificadas na tabela seguinte:

Tabela 3.5- Valores arbitrados para calcular as dimensões da fornalha.

V_{ar} (m ³)	0,57
N_c (kg/(h.m ²))	150
V_{ar} teórico (m ³ /kg)	11,07
v (m/s)	0,8
D_{cc} (m)	1,32
K (kJ/s.m ³)	175

Conhecendo os caudais mássicos presentes no subcapítulo 3.2.1, e recorrendo às equações presentes no capítulo 2 sobre o dimensionamento da fornalha, é possível determinar os valores presentes na *Tabela 3.6*.

Tabela 3.6- Valores obtidos para a área da grelha, área livre, volume da câmara de combustão, rendimento, altura da câmara de combustão e temperatura da chama.

Fornalha	A_g (m ²)	0,23
	A_i (m ²)	0,26
	V_{cc} (m ³)	1,13
	η	0,90
	H_{cc} (m)	3.6
	T_{chama}	2167

É de notar que a fornalha aqui dimensionada foi puramente um estudo académico. Isto porque, ao comprar uma caldeira, esta já é fornecida com os vários equipamentos acoplados, um dos quais a fornalha. Como tal, quando foi fornecido o orçamento da caldeira, já estavam incluídos o material e a instalação da câmara de combustão.

Caldeira

Com o propósito de efetuar o pedido de orçamento para a caldeira mais indicada para esta instalação, começou-se por calcular o caudal de vapor. Tendo como objetivo a produção de vapor a 40 bar e 450°C, obteve-se um caudal de vapor de 6.91 ton/h. Os cálculos podem ser analisados no Anexo A.

Para determinar o orçamento da caldeira, contactou-se duas empresas que produzem caldeiras com experiência em biomassa vegetal. Após o contacto com a KMW

Energy Inc.®, tendo em conta as características do combustível e o caudal, estimaram o custo da caldeira em 900 000 €.

O custo fornecido pela KMW é um valor aproximado tendo em conta uma produção de vapor de 6440 kg/h, com uma pressão de 40 bar e uma temperatura de 450°C. Este equipamento para a caldeira contém um sistema de manipulação de cinzas, um coletor multiciclone, um ventilador de tiragem induzida, uma pilha de gás com 13.5mm de altura, estrutura de apoio e os sistemas de controlo.

A eficiência do sistema foi prevista em 91.20%, sabendo que são utilizadas 30 ton/dia de combustível. O orçamento pode ser visualizado no Anexo D.

Bomba

Sabendo que vai ter uma pressão de 10 kPa num dos lados e 4000 kPa no outro, e que a temperatura do fluido ronda os 60°C, pode-se calcular o trabalho da bomba. Mas para isso considerou-se que a velocidade do fluido era igual a jusante e a montante e com valor de 1m/s. Para além disso considerou-se que o comprimento da tubagem seria de 20 m, uma altura de 2 m e que a instalação terá 2 válvulas de globo abertas e 4 cotovelos. Assim sendo, obteve-se um trabalho da bomba de 7.84 kW.

4. Quantificação do investimento

No capítulo anterior procedeu-se aos dimensionamentos dos equipamentos necessários e, com esses valores, foi possível dar início a um estudo sobre o orçamento da instalação.

Para efetuar uma análise económica e financeira é necessário ponderar todos os custos que estão associados à instalação, desde os equipamentos necessários, sua instalação, os custos operatórios e as condições financeiras.

Com base nos caudais energéticos e mássicos calculados no capítulo 3, foi solicitado um orçamento para cada equipamento dimensionado para a instalação. Resumindo, foram requeridos os orçamentos para os equipamentos principais, que podem ser consultados no anexo D, assim como o cálculo para o custo do secador que está exemplificado no anexo E. Na Tabela 4.1 podem-se observar os valores que foram fornecidos por várias entidades, sendo o custo total igual a 1 059 785€.

Tabela 4.1- Custos associados aos equipamentos

Equipamentos	
Secador	149 599 €
Triturador	10 022 €
Caldeira	900 000 €
Bombas	164 €
Valor Total	1 059 785€

Para além destes, existem outros componentes da instalação que não são os principais do processo, mas fundamentais para o correto funcionamento da central. Neste âmbito, podem ser citados componentes como as tubagens, a instalação da rede elétrica e todo o sistema de instrumentação e controlo. Na Tabela 4.2 encontram-se expostos os montantes estimados. Estes foram obtidos através de uma aproximação e por indicação de uma pessoa experiente na área, tendo como base o custo total dos equipamentos e o valor associado à instalação dos mesmos.

Tabela 4.2 - Custo dos equipamentos auxiliares e instalação do equipamento.

Equipamento	% do custo total dos equipamentos	Custo (€)
Instalação elétrica	5	48712,8
Instrumentação e controlo	15	146138,4
Tubagens, Válvulas e Bombas	5	48712,8
Total		243 564

No total, obteve-se um custo total inicial de cerca de 1 303 349 euros, em que estão implementados as infraestruturas e os equipamentos.

Não faz sentido fazer uma análise do investimento nesta situação dado que, para tal, seria conveniente dispor da informação para o processo completo de produção de energia.

5. Conclusões

5.1. Conclusão

Esta dissertação teve como objetivo o dimensionamento de uma central de incineração de resíduos de couro. Os resíduos a tratar são provenientes diretamente da indústria ou extraídos da deposição em aterro já existente.

Estabeleceu-se 30 ton/dia como a quantidade de resíduos a tratar após ajuste do teor de humidade dos resíduos extraídos do aterro. O CIETI forneceu os dados da caracterização dos resíduos.

Face a uma primeira análise do problema, o dimensionamento consistiu em 3 equipamentos essenciais: o secador, o triturador e o sistema fornalha/caldeira.

Na sequência dos cálculos efetuados no que respeita a balanços de massa, balanços de energia, dimensionamento e quantificação dos investimentos, concluiu-se o seguinte:

Necessidade de retirar 22 ton/dia do aterro para juntar às 18 ton/dia geradas pela indústria;

Granulometria dos resíduos igual a 15 mm após trituração;

Secador rotativo para os resíduos do aterro com 2 m de diâmetro e 24 m de comprimento. Caudal de ar de secagem igual a 182.4 ton/dia e necessidade térmica de 317 kW;

Fornalha com uma área de grelha de 0.23 m², uma área livre de 0.26 m² e um volume de camara de combustível de 1.13 m³.

Uma bomba com uma potência de 7.84 kW.

Uma produção de 6,91 ton/h de vapor a 40 bar e 450°C.

Um investimento inicial em equipamentos, tubagem, válvulas, instrumentação e controlo, e instalação elétrica no valor de 1 303 349 euros.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se primeiramente a integração deste trabalho com o sistema de produção de energia elétrica a partir do vapor e análise de viabilidade económica global.

Sugerem-se ainda outros trabalhos no sentido de comparar diferentes alternativas:

Estudar o efeito da adição de biomassa no sentido de aumentar a produção de vapor e conseqüente produção de energia elétrica;

Avaliar as possibilidades de gasificação e pirólise e comparar investimento, vantagens e inconvenientes. Considerar a possibilidade de produção de aglomerados de couro ou de materiais compósitos.

Bibliografia

1. 2011. How to avoid Cr (VI) formation in leathers? . *Leather March 2011*
2. Machado M. 2012. *Indústria de Curtumes: Energia e Desenvolvimento*. Instituto Superior de Engenharia do Porto 152pp (Versão PDF descarregado a 6 de Março de 2016)
3. Manuel, F,Almeida, MJF. Alguns aspectos da inceneração de resíduos de couro curtido com crómio.
4. Manuel, F,Almeida, MJF, Sousa, M.C. Inceneração de apáras de couro da indústria do calçado, Extração de crómio e/ou inertização das cinzas.
5. TAE R. 2013. *Os danos que o Cromo Hexavalente pode causar à saúde*. <http://www.revistatae.com.br/noticialnt.asp?id=6928> (Acedido a 22 de Março de 2016)
6. Empresas C. 2013. Calçado nacional,Uma indústria com vocação exportadora. 16pp (PDF descarregado a 1 de Maio de 2016)
7. Felgueiras Cd. *Aterro de resíduos Industriais*. <http://www.cm-felgueiras.pt/pt/aterro-de-residuos-industriais> (Acedido a 12 de Maio de 2016)
8. Neves,A, Bastos, F. , Ferreira, M.J., Resende, S. 2012. Guia de Boas Práticas Ambientais para a Fileira do Calçado. 37pp. (Versão PDF descarregada a 20 de Março de 2016)
9. APICCAPS. 2010. O Ambiente e a fileira do calçado Pontos a melhorar, Requisitos Fundamentais. p. 61 (Versão PDF descarregada a 20 de Março de 2016)
10. Portugal CTdCd. Ajudar empresas do calçado a cumprir a legislação ambiental p. 4 (Versão PDF descarregada a 20 de Março de 2016)
11. Fonseca, Paula; Durão, Hélder. 2015. Benchmarking de Energia. p. 104 (Versão PDF descarregada a 18 de Abril de 2016)
12. Neves S. 2013. *Preparação de Biofilmes a partir de Resíduos da Indústria de Curtumes*. Instituto Superior de Engenharia do Porto. 91pp (Versão PDF do documento descarregado em 9 de Março de 2016)
13. Mella B. 2013. *Remoção de cromo de banhos residuais de curtimento através de precipitação química e electrocoagulação*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 106pp (Versão PDF descarregada a 9 de Abril de 2016)
14. Carvalho G. 2008. *Determinação preliminar de parâmetros construtivos de barreiras reactivas permeáveis com recurso a colunas para remediação de crómio com ferro zerovalente*. Instituto Superior de Engenharia do Porto. 189 pp (Versão de PDF descarregada em 9 de Março de 2016)
15. Quinhones, J; Afonso ,M; Pinela, Ana; Madeira, Luís; 2002. *O Mercado dos Resíduos em Portugal*. Lisboa pp 269 (versão acedida a 5 de Junho de 2016)
16. Costa, Mário, Coelho,Pedro, 2007. *Combustão*.Orion 714 pp.
17. Machado L. 2014. Calculo de Rendimentos de caldeiras(Versão PDF descarregada a 1 de Maio de 2016)
18. Sousa Célia. 2009. *Valorização energética de resíduos industriais têxteis e poliméricos*. Universidade do Minho. 130pp (Versão PDF descarregada a 13 de Março de 2016)

19. Formosinho ,Sebastião, Pio ,Casimiro ,Barros ,José Henrique, Cavalheiro, José R. 2000. *Parecer Relativo ao Tratamento de Resíduos Industriais Perigosos*. Publicações Universitarias e Científicas. 302pp (Acedido a 4 de Junho de 2016)
20. Bazzo E. 1992. *Geração de Vapor*. Universidade Federal de Santa Catarina. pp 216
21. Almeida, Manuel, Ferreira, Maria, Sousa, Mara. Inceneração de apáras de couro da indústria do calçado, Extração do crómio e/ou inertização das cinzas.
22. Simioni,T, Detmer, A. 2014. Pirolise de residuos de couro curtido ao cromo em reator de leito fluidizado. COBEQ. 8pp
23. Freitas ,Christian. 2010. *Análises Cromatográficas por Clae-Dad, Termogravimétricas e morfo-anatómicas de amostras comerciais*. Universidade Federal do Para (Versão PDF descarregada a 14 de Abril de 2016)
24. Carvalho, Goreti 2008. *Determinação preliminar de parâmetros construtivos de barreiras reactivas permeáveis com recurso a colunas para remediação de crómio com ferro zerovalente*. Instituto Superior de Engenharia do Porto 189pp (Versão PDF descarregada a 9 de Março de 2016)
25. Ferreira, MJ. 2012. Valorização dos residuos de couro curtido com Crómio. 23pp. (Acedido a 13 de Março de 2016)
26. Reis, Fátima , MIGUEL, J , Sampaio, Carla , Melim M. 2004. Estratégias de Saúde Pública relativas à Exposição a Dioxinas.Programas de Vigilância Epidemiológica Ambiental- Um Exemplo de Aplicação. p. 11 (Versão PDF descarregada a 21 de Abril de 2016)
27. Paulo Helder. 2011. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas de Dioxinas e Furanos.Universidade de Aveiro.143pp (Versão PDF descarregada a 10 de Maio de 2016)
28. Figueira, S.L., .Gomes, J. Emissão de Dioxinas, Dibenzofuranos,PAHs e PCBs no fabrico de ago em forno de arco eléctrico. 8pp (Versão PDF descarregada a 9 de Maio de 2016)
29. Gestão de Qualidade. *ISO 9000*. <http://gestao-de-qualidade.info/iso-9000.html> (Acedido a 6 de Junho de 2016)
30. Alves Luís. 1991. *Tecnologias Químicas*, Fundação Calouste Gulbenkian.
31. Santos, José; C.Maria, Fernandes, Maria. 2014/2015. *Processos em Engenharia Biológica*. Tecnico de Lisboa .44pp (versão descarregada a 5 de Maio de 2016)
32. Leonel, Edimilson. 2014. *Análise da Eficiência energética e otimizaçã de secadores rotativos* Universidade Federal de São Carlos. 76 pp(Versão PDF descarregada a 16 de Abril de 2016)
33. Fabrica do Projeto . 2013. *Secador Rotativo* <http://www.fabricadoprojeto.com.br/2013/09/projeto-solicitado-27-de-setembro-de-2013-secador-rotativo-para-racao/>
34. Crispim, A. Redução dos gastos energéticos na secagem. 30 pp (Versão PDF descarregada a 17 de Agosto de 2016)
35. J. Ocon GT. 1978. *Problemas de Ingenieria Química - Tomo II*. Madrid(Versão PDF descarregada a 17 de Agosto de 2016)

36. Lopes ED. Química Industrial. p. pag. 215 (versão PDF descarregada a 20 de Setembro de 2016)
37. Assis C. 2014. Vapor de Aquecimento. p. 368 pp (PDF descarregado a 13 de junho de 2016)
38. Assis C. 2014. Vapor de Aquecimento. p. 368 (Versão PDF descarregado a 17 de Abril de 2016)
39. Costa M. 2008. Biomassa para Energia. Instituto Superior Técnico. 167pp (versão PDF descarregada a 29 de Abril de 2016).
40. Ferreira, Williams; Silva,Juarez; Silva, Jadir, Souza Cecília. 2006. Dimensionamento de uma fornalha a carvão vegetal para aquecimento de aviário. 10pp (Versão PDF descarregado a 6 de Junho de 2016)
41. Melo,Fernanda, Sousa,Juarez, Sampaio, Cristiane,Silva, Denise. 2010. Desenvolvimento e construção de fornalha para biomassa com sistema de aquecimento direto e indireto do ar. 8 pp(Versão PDF descarregada a 1 de Junho de 2016)
42. Magalhães E. 2007. *Desenvolvimento e análise de uma fornalha para aquecimento direto e indireto de ar utilizando biomassa polidispersa*. 216pp (Versão PDF descarregada a 19 de Junho de 2016)
43. Ingelibre. 2014. *Creación de un diagrama de Ostwald*. <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/04/10/creacion-de-un-diagrama-de-ostwald/> (Acedido a 25 de Agosto de 2016)
44. Gavazza L. 2014. *Utilização do cavaco de madeira como combustível alternativo para a produção de vapor de água em uma caldeira aquatubular com grelha fixa do tipo PIN HOLE*. Universidade Estadual Paulista.94 pp (Versão PDF descarregado a 19 de Março de 2016)
45. L. M. 2014. Apontamentos de Fontes de conversão
46. Correia M. 2015. *Sistemas de Bombagem de Água utilizando Energia Solar Fotovoltaica*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 104pp(Versão PDF descarregada a 08 de Outubro de 2016)
47. Souza P. 2014. *Apresentação dos cálculos para seleção de bomba para sistema de reaproveitamento de água de poços artesianos*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 76 pp(Versão PDF acedida a 8 de Outubro de 2016)
48. Grundfos. *Bombas*. <https://pt.grundfos.com/training-events/ecademy/all-topics/basic-principles-and-pump-types/centrifugal-pump-types.html> (Acedido a 8 de Outubro de 2016)
49. Esteves, Teresa. 2012-2013. Sistemas de Transporte de Fluidos (Versão PDF descarregada a 20 de Setembro de 2016)
50. CIETI/ISEP. Resultados de avaliação pelo CIETI de amostras retiradas do aterro de Felgueiras.
51. CIETI/ISEP. 2014. VALENERG - Valorização energética de resíduos industriais por gasificação e pirólise. Number of.

52. Toolbox E. *Engineering Toolbox*. <http://www.engineeringtoolbox.com/> (Acedido a 10 de Junho de 2016)
53. Kesler BILaMG. 1979. The Lee/Kesler Generalized-Correlation Tables.
54. J.F.Richardon JMC. 1989. Tecnologia Química. Vol.VI

A. Anexos A

Neste anexo estão apresentados os cálculos relativos aos balanços de massa e energia, assim como para o dimensionamento dos equipamentos.

A.1 - SECADOR

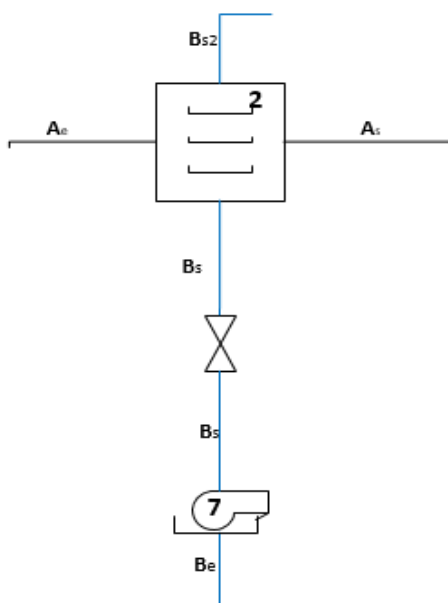


Figura A.1- Esquema do secador, incluindo todas as correntes

O esquema da Figura A.1 mostra as diferentes correntes que entram e saem no secador, sendo A a corrente de resíduos de couro, e B a corrente de ar (assumiu-se o ar ambiente com 80% de humidade relativa e 12,5 °C) que é aquecido antes de ser utilizado na secagem. Na tabela seguinte estão agrupadas as características das correntes que entram e saem do secador.

Tabela A.1- Caudal mássico e caracterização das correntes do secador.

Corrente	%Humidade (m/m)	Humidade relativa (%)	Massa(ton/dia)	T(°C)
A_e	52	-	22	-
A_s	12	-	12	-
B_e	-	80	-	12.5
B_s	-	-	-	160
B_{s2}	-	-	-	-

Sabendo que diariamente se pretende alimentar na fornalha 30 ton/dia de resíduos de couro e que 18 ton provém diariamente da indústria, necessitamos de saber qual é a quantidade que vamos retirar do aterro com uma humidade de 52% para, depois de sofrer o processo de secagem, obter um caudal mássico de 12 ton/dia com uma humidade de 12%.

$$m_{As} = m_{couro\ seco} + m_{As} \times H$$

$$12 = m_{couro\ seco} + 12 \times 0.12$$

$$m_{couro\ seco} = 10.56\ ton/dia$$

$$m_{Ae} = m_{couro\ seco} + m_2 \times H_{relativa}$$

$$m_{Ae} = 10,56 + m_{Ae} \times 0.52$$

$$m_{Ae} = 22\ ton/dia$$

Determinou-se a humidade do sólido, na corrente A_e e A_s:

$$X_{As} = \frac{\% \acute{a}gua}{\% \acute{s}olido\ seco} = \frac{12}{88} = 0.136$$

$$X_{Ae} = \frac{\% \acute{a}gua}{\% \acute{s}olido\ seco} = \frac{50}{50} = 1$$

Para determinar as condições das correntes 1, 5 e 6 recorreu-se à carta psicométrica, conforme anexo C, assumindo que a secagem é adiabática. Existem valores que se mantêm constantes à entrada e à saída dos equipamentos, na corrente de ar, que são:

$$y_{eBe} = y_{eBs}$$

$$T_{wBs} = T_{wBs2}$$

Após consulta da carta de humidade do ar, presente no Anexo C, obteve-se:

Tabela A.2- Valores observados na carta psicométrica.

	Y _E	T _w (°C)	T
B_E	0.008	13	12,5
B_S	0.008	43	160
B_{S2}	0.058	43	45

Após determinar a humidade do sólido e as humidades específicas, que estão apresentados na *Tabela A.3*, calculou-se o caudal mássico de ar seco, G, necessário para secar o sólido de 52 % de humidade até 12 % de humidade.

$$G(Y_{Bs2} - Y_{Be}) = -S'(X_{As} - X_{Ae})$$

$$G(0,058 - 0.008) = -10,56 \times 1000 \times (0.136 - 1)$$

$$G = 182400\ kg/dia$$

De seguida calculou-se o calor necessário para que o caudal de ar consiga atingir a temperatura de secagem estabelecida, 160°C, tendo-se recorrido à equação:

$$Q = G(H_{Be} - H_{Bs})$$

A entalpia do ar é calculada com base no calor específico do ar húmido, na temperatura, na humidade específica do ar e no calor latente da água a 0°C.

$$H = cp_h(T - 0) + y_e \lambda_0$$

O calor específico do ar varia com a humidade específica e é calculado pela seguinte equação:

$$cp_h = 0.24 + 0.46y_e$$

Obtendo-se os valores presentes na *Tabela A.3*:

Tabela A.3- Valores do calor específico do ar húmido e da entalpia das correntes Be e Bs.

C_{phBe}	0,24
C_{phBs}	0,24
C_{phBs2}	0,27
H_{Be} (kcal/kg)	7,83
H_{Bs} (kcal/kg)	43,77

Substituindo, determinou-se um calor de 6555 Mcal/dia, que corresponde a 27401 MkJ /dia, necessário para o aquecimento do ar, equivalente a uma potência de 317 kW.

Após determinar o caudal de ar necessário, procedeu-se ao dimensionamento do secador. Para tal, utilizaram-se as equações 4 e 5 referidas no capítulo 2, assumindo um valor de G' igual a 2.500.

$$z = 0.0175 * G'^{0.84} \times c \times d \times \ln\left(\frac{T_{Bs} - T_w}{T_{Bs2} - T_w}\right) \quad \text{Equação 4}$$

$$d = \left(\frac{4W_g}{\pi G'}\right)^{0.5} \quad \text{Equação 25}$$

Como G, caudal de ar seco, é igual a 182400 kg/dia, 7600 kg/h, e a humidade específica do ar à entrada do secador é 0,008 kg vapor de água/kg ar seco, Wg será igual a 7660 kg/h. Então:

$$d = 2 \text{ m}$$

$$z = 24 \text{ m}$$

A.2 - FORNALHA

No que toca ao dimensionamento da fornalha, é importante conhecer o caudal de ar e o caudal de gases, assim como a dimensão das grelhas e o volume da câmara de combustão, visto que vai ser utilizada uma fornalha para queima em grelha. O pressuposto inicial é que diariamente serão incinerados 30 ton de resíduos de couro.

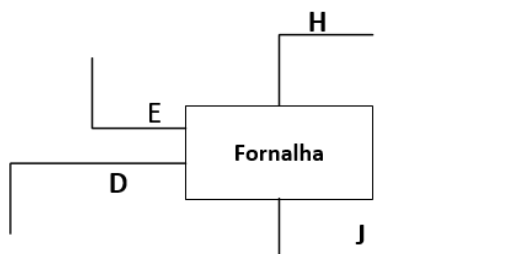


Figura A.2-Representação das correntes que envolvidas na fornalha.

Em que D é a corrente de resíduos de couro, E a corrente de ar necessária para a combustão, H é o caudal de gases e J o caudal de cinzas. Na Tabela A.4 estão agrupadas as características nas correntes que entram e saem do secador.

Tabela A.4- Valores conhecidos das correntes que atravessam a fornalha.

	%H	Massa (ton/dia)	T (°C)
D	12	30	-
E	-	-	-
H	-	-	-
J	-	2.11	-

Pelas características do produto, sabe-se que existe 9.1 % de matéria mineral e por isso, é possível considerar que o caudal de cinzas é composto por toda a material mineral.

$$m_J = m_D \times \%_{\text{matéria mineral}}$$

Pela tabela estequiométrica, presente no Anexo B, determinou-se o caudal de ar necessário para a combustão completa com excesso de ar, m_E . Conhecendo o caudal de ar, o caudal de cinzas e o caudal de combustível, foi possível determinar o caudal de gases de combustão devido a um balanço mássico ao sistema, m_H .

Assumiu-se que a temperatura dos gases de combustão é igual a temperatura de chama, e para obter este valor determinou-se o Q_i e arbitrou-se temperaturas de saída, até que a ordem de grandeza fosse a mesma, como se pode observar nos cálculos seguintes.

Para calcular o Q_i , é necessário conhecer o poder calorífico inferior dos componentes de entrada, sendo relevantes apenas o PCI do carbono e do hidrogénio, que são respetivamente 7831 e 33887 kcal/kg.

$$Q_i = mPCI$$

$$Q_i = \%_{H_2}PCI_{H_2} + \%_CPCI_C$$

$$Q_i = 512411,3 \text{ kcal/dia}$$

Tabela A.5- Valores do Cp consoante a temperatura e a respetiva energia térmica⁽⁴⁵⁾

		T(°C)	
		1500	3000
Cp (kcal/(kg°C))	O ₂	0,256	0,274
	N ₂	0,276	0,294
	CO	0,28	0,297
	CO ₂	0,285	0,307
	H ₂ O	0,546	0,623
Q _F (kcal/dia)		339012	731814

O valor da temperatura foi determinado a partir de uma interpolação, entre os valores das temperaturas e da energia envolvida, representados na tabela anterior.

Na *Tabela A.6*, estão apresentados os caudais mássicos e a temperatura da chama.

Tabela A.6- Valores determinados pelos balanços mássicos, dos caudais da corrente E, J e H e a temperatura de combustão.

m_E (ton/dia)	5,95
m_J (ton/dia)	2,40
m_H (ton /dia)	33,54
T₉ (°C)	2166

Na caracterização da matéria-prima, efetuada pelo CIETI foi fornecido o valor do poder calorífico superior, 20478 kJ/kg. Recorrendo a $PCS = PCI + 589 m_{H_2O}$ Equação 26, obteve-se um PCI de 20375kJ/kg.

$$PCS = PCI + 589 m_{H_2O} \quad \text{Equação 26}$$

Para conseguir determinar os parâmetros referidos no capítulo 4.2, foi necessário arbitrar alguns valores^(40: 41) Estas considerações estão presentes na *Tabela A.7*

Tabela A.7- Valores arbitrados. (40; 41)

V_{ar} (m ³ /s)	0,57
N_c (kg/(h.m ²))	150
V_{ar} teórico (m ³ /kg)	11,07
v (m/s)	0,8
D_{cc} (m)	1,32
K (kJ/s.m ³)	175

A capacidade calorífica dos gases, foi calculada a partir dos valores presentes na tabela estequiométrica, tornando-se assim possível calcular a média ponderada, resultando num valor de 1.30 kJ/(kg°C).

Inicialmente começou-se por calcular a energia necessária para aquecer a quantidade de ar que introduzida na fornalha, Q_u .

$$Q_u = \dot{m}_{ar} \times c_p \times \Delta T \quad \text{Equação 27}$$

Obtendo-se um valor de 641009 kJ/h, depois conhecendo o valor do poder calorífico e o rendimento da caldeira determinou-se o fluxo mássico de combustível, obtendo um valor de 34,96 kg/h. Por conseguinte, calculou-se o volume da câmara de combustão, a altura da câmara de combustão, a área livre e a área total da grelha. Os resultados podem ser observados no capítulo 3.

A.3 – BOMBA

O vapor produzido pela caldeira tem a finalidade de ser alimentado a uma turbina par produção de energia elétrica, após o que é condensado devendo então retornar à caldeira. Para tal será necessário dimensionar uma bomba, o que se faz seguidamente.

Premissas estabelecidas para o cálculo da bomba:

- A velocidade do fluido é de 1 m/s;
- Entre o condensador e a caldeira, existe uma diferença de cota de 2 metros e uma distância de 20 m;
- A tubagem contém 4 cotovelos de 90° e duas válvulas de globo totalmente abertas;
- A velocidade e caudal à entrada e à saída da bomba é constante;
- O caudal de vapor formado é igual ao caudal de condensado, isto é, não existiram perdas.

Considerando alguns dos valores arbitrados pode-se calcular o número de Reynolds, e como o valor é superior a 2100, o fluido está em regime turbulento. Em relação ao valor da viscosidade considerou-se 0.467, à temperatura de 60°C.⁽⁵²⁾

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

$$Re = \frac{983 \times 1 \times 0.087}{0.467 \times 10^{-3}}$$

$$Re = 186103$$

Continuando a admitir que a velocidade é 1 m/s, e considerando que o caudal volumétrico é 7.03 m³/h. Pode-se determinar o raio a partir da área transversal ao fluxo do fluido.

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{Q}{\pi r^2}$$

$$1 = \frac{7.03}{\pi r^2}$$

$$r = 0,044 \text{ m}$$

Através da bibliografia sabe-se que, o fator corretivo da velocidade, α , pode tomar o valor de 0.5, em regimes laminares, e 1, em regimes turbulentos. Nesta situação, como o número de Reynolds demonstra que estamos a trabalhar com um regime turbulento, conclui-se que o fator corretivo de velocidade é 1.

No balanço energético existe um componente que representa as perdas de carga, elas podem existir por atrito ao longo da tubagem ou perdas de carga por mudança na direção de transferência do fluido.

Nas perdas ao longo da tubagem é necessário determinar pelo diagrama de Reynolds, o valor do fator de Fanning. A leitura do gráfico é efetuada conhecendo o de Reynolds e o tipo de tubo, nesta situação considerou-se que para a instalação em causa recorrer-se-ia a um tubo de cobre liso. Com o número de Reynolds e a consideração referida, pode-se ler o valor do fator de Fanning, que é aproximadamente 0,0045. Esta leitura, pode ser verificada do Anexo C.

$$F_f = 2f \frac{L}{D} v^2$$

$$F_f = 2 \times 0,0045 \times \frac{20}{0.088} \times 1^2$$

$$F_f = 2.03 \text{ J/g}$$

Considerando que os cotovelos se encontram em ângulos de 90°, consultou-se as tabelas do Geankoplis, e verificou-se que a constante de perdas de carga tem um valor de 0,75.

$$F_a = K_a \frac{v^2}{2\alpha}$$

$$F_a = 0,75 \frac{1^2}{2 \times 1}$$

$$F_a = 0.37 \text{ J/kg}$$

Utilizou-se também duas válvulas de globo abertas, se em ângulos de 90°, sendo que neste o valor de perdas de carga era 6, segundo o Geankoplis.

$$F_a = K_a \frac{v^2}{2\alpha}$$

$$F_a = 6 \frac{1^2}{2 \times 1}$$

$$F_a = 3 \text{ J/Kg}$$

No total, somando os três principais fatores de perdas de carga, pode-se obter um valor de 9.65 J/kg.

$$\sum F_{1-2} = F_f + F_a \times \text{número de cotovelos} + F_a \times \text{número de valvulas}$$

$$\sum F_{1-2} = 2.03 + 0.375 \times 4 + 3 \times 2$$

$$\sum F_{1-2} = 9.53 \text{ J/kg}$$

Substituindo todos os valores considerados e calculados anteriormente, no balanço de energia, consegue-se determinar a potência da bomba, W.

$$\frac{P_1}{\rho} + gz_1 + \frac{1}{2\alpha} v_1^2 + W = \frac{P_2}{\rho} + gz_2 + \frac{1}{2\alpha} v_2^2 + \sum F_{1-2}$$

$$\frac{10 \times 1000}{983} + 9,8 \times 0 + \frac{1}{2 \times 1} 1^2 + W = \frac{4000 \times 1000}{983} + 9,8 \times 2 + \frac{1}{21} 1^2 + 9.53$$

$$W = 4088.13 \text{ J/kg}$$

$$W = 4088.15 \times \frac{6912}{3600} \times \frac{1}{1000}$$

$$W = 7.84 \text{ kW}$$

A.4 – PRODUÇÃO de VAPOR

Para calcular o caudal de vapor produzido, considerou-se duas situações: vapor saído a 40 bar e 450°C e vapor saído a 25 bar e 450°C. Considerando que o vapor sai sobreaquecido é necessário calcular o caudal de vapor formado e perceber qual terá maior produção.

Para calcular o caudal de vapor, é necessário conhecer as entalpias, nas respetivas fases. Os valores da Tabela A.8 foram retirados das tabelas de vapor saturado e sobreaquecido.

Tabela A.8- Valores das entalpias de vapor saturado e sobreaquecido a diferentes pressões. (53)

	Condições	Entalpia (kJ/kg)		H _{Sobreaquecido} (kJ/kg)
Entrada	10 kPa	H _L	192,5	
Saída	40 bar 450°C	H _L	1087,4	3331,2
		H _V	2800,3	
	25 bar 450°C	H _L	961,96	3351,3
		H _V	2800,9	

Calculado o Cp médio a aproximadamente 2100°C, temperatura da chama, obteve-se um valor de 1.30 kJ/kg°C. Na Tabela A.9 encontram-se os valores que foram utilizados, assim como o Cp médio em Kcal/kg°C.

Tabela A.9- Valores do calor específico de cada constituinte dos gases, assim como o calor específico médio. (45)

Cp (kcal/kg°C)	
O ₂	0,26
N ₂	0,28
CO	0,28
CO ₂	0,29
H ₂ O	0,58
Cp _{médio}	0,31

$$m_{gases} c_{p_{gases}} (T_s - T_e) = -m_{vapor} (H_s - H_e)$$

$$33548.84 \times 1.30 \times (160 - 2167) = -m_{vapor} (3331,2 - 2800,3)$$

Para as condições de 40 bar e 450 °C obteve-se um caudal de vapor de 6,91 ton/h e para as condições de 25 bar e 450 °C obteve-se um caudal de 6,66 ton/h.

B. Anexo B

Tabela B.1- Representação da tabela estequiometria da reação completa de combustão.

Combustão Completa																	
Combustível			Comburente				Produtos de combustão										
			Fator multiplicador		Necessário		Fator multiplicador					Resultantes					
	% mássica	%molar	O ₂	Ar	O ₂	Ar	SO ₂ +CO ₂	H ₂ O	N ₂				CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	Mineral
C	38,016	3,168	1	4,76	3,168	15,07968	1		3,76				3,168	0	11,91168		
H₂	6,336	3,136634	0,5	2,38	1,568317	7,465188		1	1,88				0	3,136634	5,896871		
N₂	10,032	0,358286													0,358286		
O₂	25,608	0,80025														0,80025	
H₂O	12	0,666667												0,666667			
mineral	8,008																8,008
	100																
Totais					4,736317	22,54487							3,168	3,8033	18,16684	0,80025	8,008
Dedução do O₂					3,936067	21,6871							3,168	3,8033	18,16684	0	8,008

$$\begin{aligned}
 &22,49 \frac{100}{21} \rightarrow \\
 &x = 4,72 \rightarrow 4,72 - 0,8 = 3,92
 \end{aligned}$$

Tabela B.2- Representação da tabela estequiometria da reação completa de combustão com 30% de excesso de ar.

Combustão Incompleta																	
Combustível			Comburente				Produtos de combustão										
			Fator multiplicador		Necessário		Fator multiplicador					Resultantes					
% mássica	%molar		O ₂	Ar	O ₂	Ar	CO	H ₂ O	N ₂	O ₂	CO ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	Mineral	CO
C	38,016	3,168	1	4,76	3,168	15,07968	0,3		3,76	0,5	0,7	2,2176	0	11,91168	1,584		0,9504
H₂	6,336	3,136634	0,5	2,38	1,568317	7,465188		1	1,88			0	3,136634	5,896871			
N₂	10,032	0,358286												0,358286			
O₂	25,608	0,80025													0,80025		
H₂O	12	0,666667											0,666667				
Mineral	8,008															8,008	
	100																
Totais					4,736317	22,54487						2,2176	3,8033	18,16684	2,38425	8,008	0,9504
Dedução do O₂					3,936067	21,6871	$\frac{22,49 \times 100}{21} \rightarrow$ $x = 4,72 \rightarrow 4,72 - 0,8 = 3,92$					2,2176	3,8033	18,16684	1,584	8,008	0,9504
Excesso de ar				1,15	8,462544	205,2151						2,2176	3,8033	18,16684	1,584	8,008	0,9504
Excesso de ar 1,15 em kg					270,8014	5951,239						97,5744	68,45941	508,6714	50,688		26,6112

C. Anexo C

Neste subcapítulo estão presentes os apêndices que serviram de base para fundamentação de vários valores que foram utilizados ao longo da dissertação.

TABLA 11.21 Calor específico medio para distintos gases a presión constante entre 0 °C y t °C kcal/kg °C (no se tiene en cuenta la disociación a altas temperaturas)

t °C	O ₂	N ₂	Aire	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O (vapor)	Metano	Etileno	Etano	Benceno (vapor)
0	0,218	0,248	0,240	0,249	3,40	0,195	0,443	0,496	0,342	0,397	0,224
100	0,220	0,248	0,240	0,249	3,44	0,208	0,445	0,545	0,387	0,450	0,273
200	0,223	0,249	0,242	0,250	3,45	0,219	0,450	0,590	0,431	0,501	0,316
300	0,227	0,250	0,243	0,252	3,46	0,228	0,456	0,634	0,470	0,548	0,356
400	0,230	0,252	0,246	0,254	3,46	0,236	0,462	0,677	0,508	0,594	0,390
500	0,234	0,254	0,248	0,257	3,47	0,244	0,470	0,719	0,542	0,636	0,422
600	0,237	0,256	0,250	0,259	3,48	0,250	0,477	0,758	0,574	0,676	0,446
700	0,240	0,258	0,253	0,262	3,49	0,256	0,485	0,794	0,602	0,713	0,474
800	0,243	0,261	0,256	0,265	3,50	0,261	0,494	0,830	0,628	0,748	0,494
900	0,245	0,264	0,258	0,268	3,51	0,266	0,501	0,864	0,651	0,780	0,514
1000	0,247	0,266	0,260	0,270	3,53	0,270	0,510	0,896	0,671	0,810	0,534
1100	0,249	0,268	0,263	0,273	3,55	0,274	0,517				
1200	0,251	0,271	0,265	0,275	3,57	0,277	0,525				
1300	0,253	0,272	0,267	0,277	3,59	0,280	0,531				
1400	0,255	0,275	0,269	0,278	3,61	0,283	0,540				
1500	0,256	0,276	0,271	0,280	3,63	0,285	0,546				
1600	0,258	0,278	0,272	0,282	3,65	0,288	0,552				
1700	0,258	0,280	0,273	0,283	3,67	0,290	0,560				
1800	0,260	0,281	0,274	0,285	3,69	0,292	0,566				
1900	0,262	0,282	0,276	0,286	3,71	0,293	0,572				
2000	0,263	0,284	0,277	0,287	3,74	0,295	0,577				
2100	0,264	0,285	0,278	0,289	3,76	0,297	0,583				
2200	0,265	0,286	0,279	0,290	3,78	0,298	0,588				
2300	0,266	0,288	0,280	0,291	3,80	0,300	0,595				
2400	0,267	0,288	0,281	0,292	3,82	0,301	0,598				
2500	0,268	0,289	0,282	0,293	3,84						
2600	0,269	0,291	0,283	0,294	3,86	0,303	0,608				
2700	0,270	0,291	0,284	0,295	3,87	0,304	0,612				
2800	0,271	0,292	0,284	0,295	3,89	0,305	0,617				
2900	0,272	0,293	0,285	0,296	3,91	0,306	0,621				
3000	0,274	0,294	0,286	0,297	3,93	0,307	0,623				

t °C	Propano	Butano
0	0,359	0,342
100	0,407	0,390
200	0,456	0,438
300	0,504	0,486
400	0,553	0,534
500	0,601	0,582
600	0,650	0,630
700	0,698	0,678
800	0,747	0,726
900	0,795	0,774
1000	0,844	0,822

Figura C.1- Calor específico dos componentes dos gases de combustão, a pressão constante e a temperatura variável.

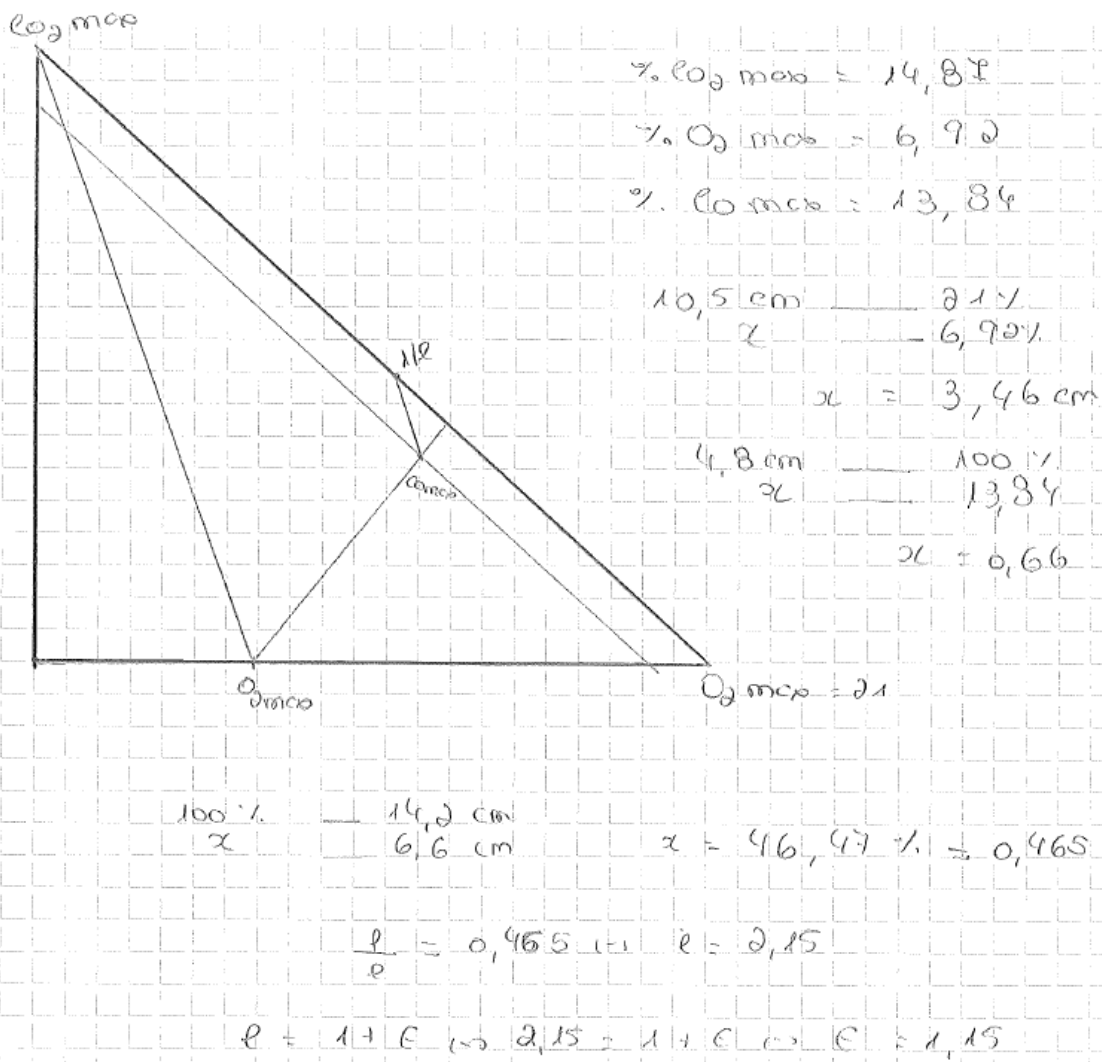


Figura C.2- Esquema e cálculos referentes ao triângulo de Ostwald.

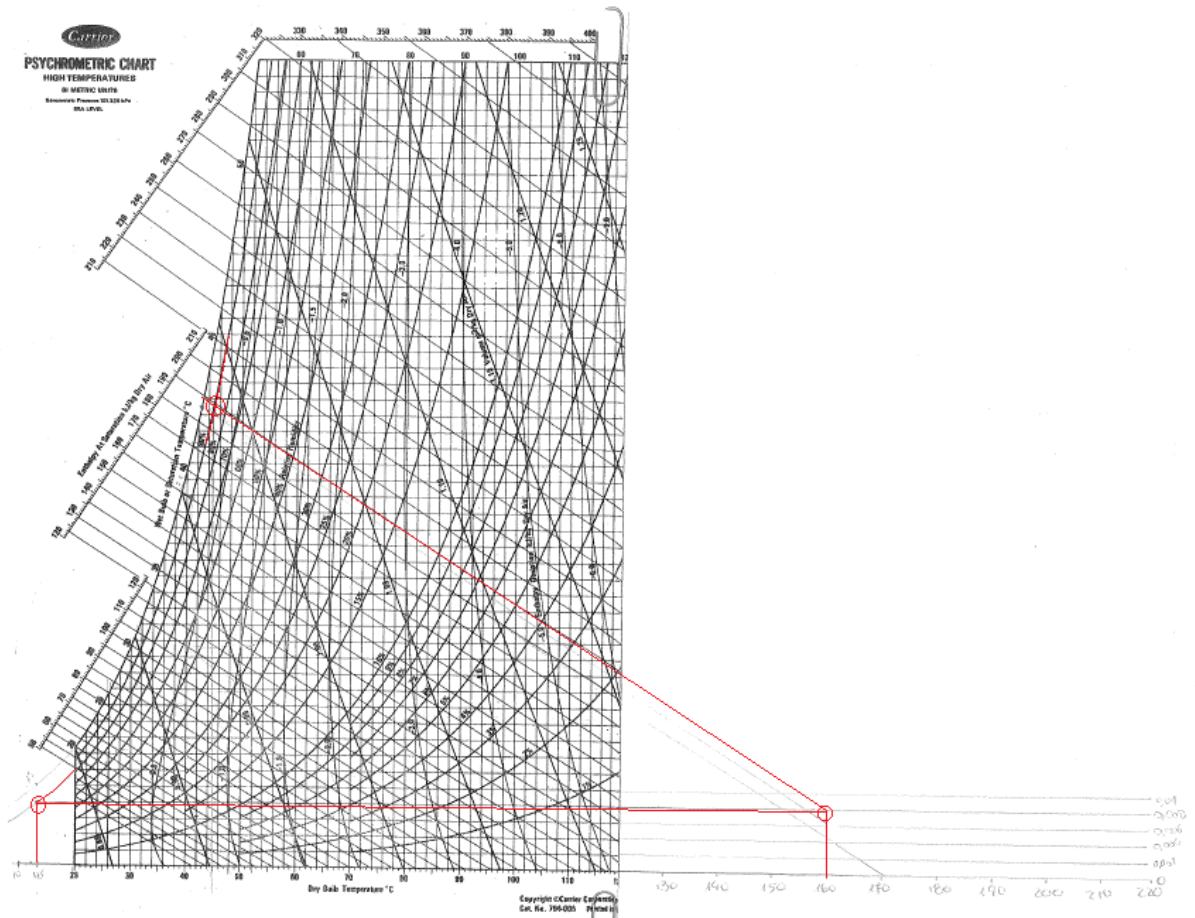


Figura C.3- Diagrama da carta psicrométrica, com prolongamento até ao 160°C.

Diagrama Moody

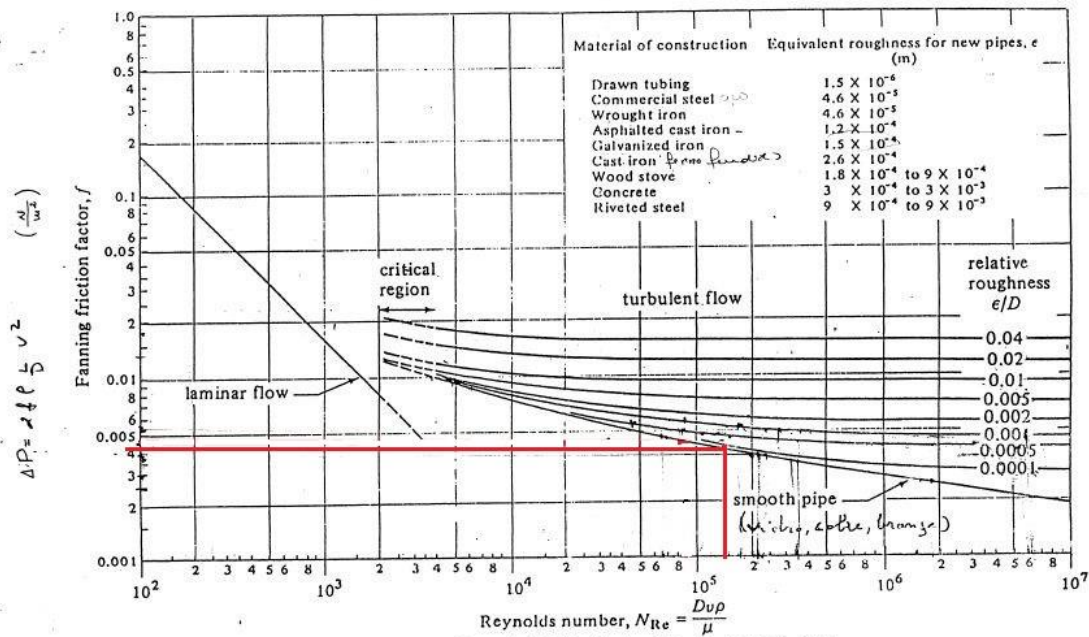


FIGURE 2.10-3. Friction factors for fluids inside pipes. [Based on L. F. Moody, Trans. A.S.M.E., 66, 671, (1944); Mech. Eng. 69, 1005 (1947). With permission.]

Figura C.4- Diagrama de Moody de onde foi retirado o fator de fanning.

Type of Fitting or Valve	Frictional Loss, Number of Velocity Heads, K_f	Frictional Loss, Equivalent Length of Straight Pipe in Pipe Diameters, L/D
Elbow, 45°	0.35	17
Elbow, 90°	0.75	35
Tee	1	50
Return bend	1.5	75
Coupling	0.04	2
Union	0.04	2
Gate valve → válvula aduça		
Wide open	0.17	9
Half open	4.5	225
Globe valve → válvula de globo		
Wide open	6.0	300
Half open	9.5	475
válvula angular → Angle valve, wide open	2.0	100
válvula retencão → Check valve		
bola → Ball	70.0	3500
sanfona → Swing	2.0	100
Water meter, disk	7.0	350

Figura C.5- Perdas por atrito através das válvulas e ligações para regimes turbulentos.

D. Anexo D

Neste anexo estão ilustrados os orçamentos de alguns equipamentos. O orçamento dos equipamentos, foi consultado via *e-mail* a partir do contacto com diferentes empresas, sendo disponibilizadas pequenas partes desses contactos para que seja possível verificar os valores exposto no capítulo 4.

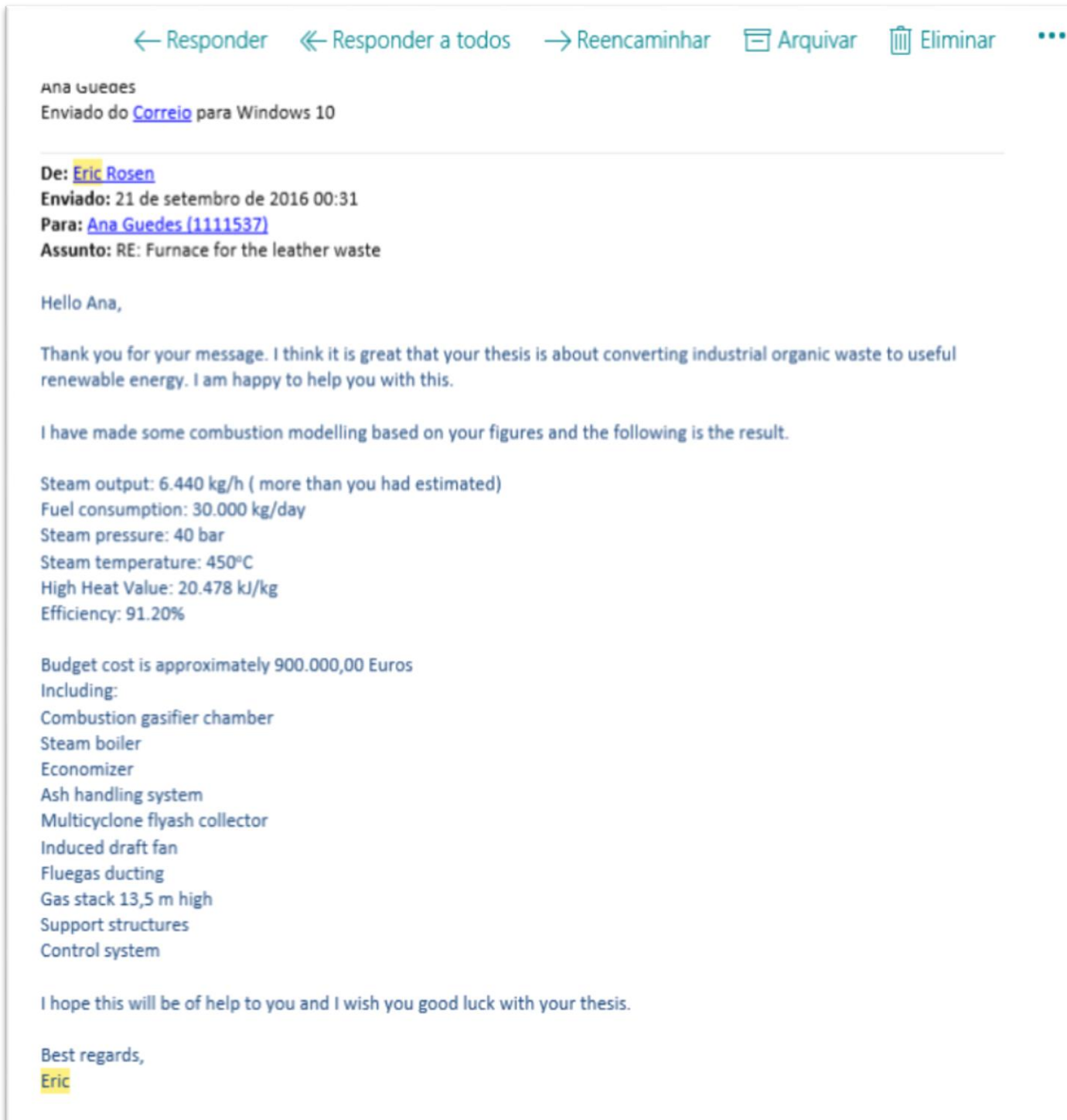


Figura D.1- Orçamento de uma caldeira, via e-mail.



Equipamentos

- Potência motor elétrico 2 x 12,5 cv
- Sistema de redução epicicloidal .
- Caixa do redutor sistema monobloco.

TENSÃO ELÉTRICA

- 220 ou 380 ou 440v trifásicos

PESO APROXIMADO

- 2800 Kg.

Produção Kg/Hrs.

- Papel de 400 a 1500
- Madeira de 300 a 1800
- Plástico de 400 a 2000
- Borracha de 600 a 2000
- Metal de 800 a 3000
- Resíduo Classe I e II de 800 a 2000

VALOR UNITÁRIO de Triturador de US\$ 36.150,00

CONDIÇÕES COMERCIAIS

- Condições de pagamento: 50 % no pedido, 50 % contra entrega
- Preço EXW. Curitiba - SP
- Prazo de entrega 60 DIAS APÓS O PAGAMENTO DA ENTRADA.
- Garantia 12 meses após a entrega

Não incluso

- Fornecimento e montagem de todos os pontos, ligações ou calhas elétricas até o quadro elétrico geral da máquina;
- Despesas de viagem para start - up do equipamento.

Incluso

- Assistência a montagem;
- Start - up.

DESCRIÇÃO GERAL

- O triturador é formado por uma câmara de trituração que contém dois eixos rotantes munidos de facas de diferentes espessuras e com um ou mais bicos, em função do tipo de material a ser triturado.
- O material vem alimentado através de uma tremonha de carga (funil) colocada sobre o triturador, as facas através dos bicos engancham o material e o levam ao centro do triturador. O material passando através das facas vem cortado e cai por gravidade embaixo do triturador.
- No painel elétrico é instalado um sistema de controle eletrônico que permite a inversão automática temporizada da rotação dos eixos do triturador, em caso de sobrecarga.

SUORTE DO TRITURADOR

Suporte construído em perfil de aço soldado, com painéis laterais e posteriores parafusados. No frontal do suporte é realizada a porta para extração do moinho para eventual inspeção e manutenção do mesmo.

Validade da proposta mês do orçamento.

Temos também:



ORIGINAL

Júlio Nogueira Rodrigues & Cª, LDA
 Escritório e Fábrica : Avenida Santiago, Nº 43
 Zona Industrial de Rio Meão - 4520/475 Rio Meão
 Tel. 256 - 783742 / 780910 Fax: 256 - 086155
 Email : geral@jnr.pt Web : www.jnr.pt
 Contribuinte nº 500 834 776
 Cons. Reg. Comercial do Porto Nº 23551
 Capital Social 99.759,58 €

JNR Proposta Nº **1314**

Rita Guedes

Art:

Rio Meão

Tel.

Fax

Vendedor : Ricardo Couto Data : 21.10.2018
 Agradecendo desde já a Viconsulta, vimos por este meio apresentar os nossos melhores preços para o solicitado :

Referência	Designação	Quantidade	Pr.Unitário	Descontos	Total	T.X.
006827	Bomba UPS 2 15-6000 Ref: 90243667	1,0	229,00	40,00	132,82	23,00

BPI-NIB: 0010 0090 1330260001 49 CGD-NIB: 0035 2030 00018306230 24

Página 1

Julgando ter respondido ao solicitado por V. Ex.as, continuamos ao Vosso dispor para qualquer esclarecimento.

Software PHC - Processado por programa certificado nº 0006IAT (20160628)-Este documento não serve de fatura

Taxa	Base de Incidência	Valor do I.V.A.
0 %		
23 %	132,82	30,55
6 %		
13 %		

Total Líquido	132,82
Total de I.V.A.	30,55
TOTAL do DOCUMENTO	163,37 €

CONDIÇÕES COMERCIAIS

Prazo de Validade

Modo de Pagamento
 00-Pronto (Ao levantar)

Prazo de Entrega

PI Departamento Comercial

(Ricardo Couto)

Figura D.3- Orçamento de uma bomba para a instalação, via e-mail.

E. Anexo E

O custo do secador, foi calculado tendo por base valores retirados da bibliografia.⁽⁵⁴⁾

Conhecendo o diâmetro do secador rotativo e o comprimento, 2 e 24 m respectivamente, foi possível determinar a área, resultando num valor de 138.23 m².⁽⁵⁴⁾

$$Custo = 6000 \times A^{0.45}$$

$$Custo = 6000 \times 138.23^{0.45}$$

$$Custo = 55134.37 \text{ Libras}$$

$$Custo_{atualizado} = Custo \times \frac{I_{at}}{I_{1979}}$$

Tomou-se como referência os valores do índice de custo para o ano de 2014, 574.1, como o atual, e o valor de 1979, 238.7. Assim sendo, obtém-se 133066.2 libras. Sabendo que uma libra neste momento equivale a 1.12425 euros, determinou-se o custo atual em euros, obtendo-se assim um valor de 149.599.7 euros.