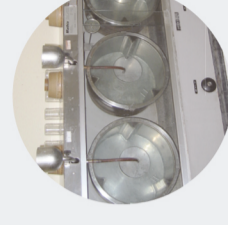
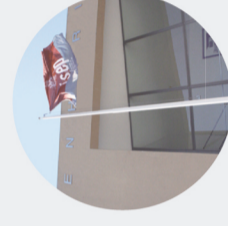




## Seleção de ventiladores para uma caldeira alimentada a biomassa.

RENATA SOFIA SOARES DE ALMEIDA SOUSA PINTO

Novembro de 2018



## Seleção de ventiladores para uma caldeira alimentada a biomassa

RENATA SOFIA SOARES DE ALMEIDA SOUSA PINTO  
Novembro de 2018



# Seleção de ventiladores para uma caldeira alimentada a biomassa.

Renata Sofia Soares de Almeida Sousa Pinto

[1130428@isep.ipp.pt](mailto:1130428@isep.ipp.pt)

Tese realizada em ambiente empresarial:

Silvino Lindo – Ibérica S.A

**Para Obtenção de Grau de Mestre**

**Mestrado** em Engenharia Química

**Ramo** Energia e Biorrefinaria

**Orientadores:**

Eng.<sup>a</sup> Elisa Ramalho – **ISEP**

Eng.<sup>o</sup> João Guedes - **SML**

2017-2018



***Para o meu pai.***



## Agradecimentos

Todo este percurso só foi possível devido a um conjunto de pessoas e entidades que permitiram com que esta reta final fosse de certa forma, satisfatória e prazerosa.

Quero agradecer à empresa SML e a todos os seus colaboradores por me tão bem receber e acompanhar e que fizessem parte da minha fase final da vida académica. Assim sendo, tenho que agradecer toda a ajuda disponibilizada ao Sr. Branco, por me ter dado a conhecer todos os saberes relativamente a caldeiras.

Ao meu orientador Eng.<sup>o</sup>. João Guedes por ter feito parte da minha breve estadia na empresa.

Quero agradecer principalmente a minha orientadora do ISEP, Eng.<sup>a</sup> Elisa Ramalho, por ser incansável e por toda a preocupação para eu ser bem-sucedida num tema tão “complicado” como este devido a todos os contratemplos que apareceram.

Um especial agradecimento a quem me muito aturou ao longo dos anos e a quem nunca me deixou desistir, pois sempre me animaram e sempre fizeram de mim alguém otimista e batalhadora: Ângela, Ana Catarina e Maria Antónia um gigante obrigada.

Aos que me acompanharam ao longo de cinco anos fantásticos, os meus obesos, mas aos que me acompanharam nestes últimos dois anos tenho que fazer especial referência: Francisca Baia Baia, Patrícia Coelho, João Silva, Sérgio Moreira, Pedro Gonçalves e Diogo Boaventura, devo-vos o meu muito obrigado.

Tenho que agradecer a ti, mãe, e a ti Renato, por serem a minha família e por me terem ajudado nas dificuldades e por festejarem quando alcanço os meus objetivos!

Toda a minha tese é dedicada ao meu pai pois tenho a certeza absoluta que hoje, diria que tinha orgulho em dizer que tinha uma filha Mestre Engenheira Química.

*“No ISEP entrei e aprendi, cinza e tijolo, vivo por ti”*

## Resumo

A dependência dos combustíveis fósseis tem sido uma constante ao longo dos anos, o que levou à procura de outras alternativas para a obtenção de grandes quantidades de energia que possibilitem satisfazer as necessidades do quotidiano do ser humano. A utilização de alternativas mais sustentáveis, ecológicas e que consigam substituir em termos energéticos o que os combustíveis fósseis oferecem em grandes quantias tem sido um desafio até aos dias de hoje.

Assim sendo, apareceu a biomassa como alternativa para reduzir a dependência do petróleo, carvão e do gás natural, em sistemas de aquecimento como é o caso das caldeiras.

O objetivo principal da presente tese, que decorreu na empresa Silvino Lindo Ibérica – S.A, passa pela seleção de dois ventiladores de tiragem forçada, para ar primário e ar secundário, a alimentar a uma caldeira de tubos de fumos com potência igual a 4,0 MW e rendimento de 80% alimentada a biomassa e pela comparação entre os ventiladores selecionados e os ventiladores que a empresa efetivamente colocou na caldeira.

Numa primeira fase é feita a caracterização da biomassa (serrim de madeira) bem como o caudal de combustível para alimentar a caldeira. Para determinar a quantidade de combustível foi necessário a determinação do seu poder calorífico inferior. A caracterização foi realizada com base na análise última e próxima e com estes resultados calculou-se por dois métodos a quantidade de ar que os ventiladores devem fornecer para a reação de combustão. Pelo método 1 calcula-se o caudal de ar estequiométrico usando a informação da análise elementar do serrim e pelo método 2, utilizado pela empresa, usa-se uma expressão empírica desenvolvida para madeira com uma composição típica. Para caldeiras alimentadas a biomassa como a lenha são utilizados fatores de excesso de ar entre 1,8 a 2. Estes valores foram considerados no decorrer de todo o trabalho.

Após a determinação do caudal de ar primário e secundário, são ainda determinadas, as perdas de carga totais que o ar sofre desde a saída dos ventiladores até à entrada da fornalha. A obtenção destes dois parâmetros, caudal de ar e perda de carga, permite selecionar o melhor ventilador. Os caudais de ar primário e secundário obtidos são, respetivamente, 6795 m<sup>3</sup>/h e 3883 m<sup>3</sup>/h e os valores para as perdas de carga totais no percurso de ar primário e secundário correspondem aos valores de 504 e 190 mm c.a.

Usando as curvas características dos ventiladores de ar primário e secundário que a empresa SML instalou na caldeira, obtiveram-se os valores de eficiência, de velocidade de rotação e de potência de 86 %, 2935 rpm e 7,5 KW, para o ventilador de ar primário, e de 82%, 2000 rpm e 2,2 KW para o ventilador de ar secundário.

Os ventiladores selecionados pela empresa SML foram da Marca MZ, o modelo GR 560/2 para o ventilador primário e o modelo GR 500/2 para o ventilador secundário. O ventilador de ar primário (GR 560/2) é adequado aos requisitos determinados neste trabalho mas o ventilador de ar secundário (GR 500/2) não é o mais adequado pois funcionaria a um valor de rotação próximo do valor mínimo.

## Abstract

The dependence of fossil fuels has been a constant over the years, which has led to the search for other alternatives to obtain large amounts of energy that make it possible to meet the daily needs of the human being. The use of more sustainable, environmentally friendly and energy-efficient alternatives to fossil fuels has been a challenge to the present day.

Thus, biomass appeared as an alternative to reduce dependence on oil, coal and natural gas, in heating systems such as boilers.

The main objective of this thesis, that took place at Silvino Lindo Ibérica- S.A, it's the selection of two forced-draft fans for primary air and secondary air, to a biomass boiler of smoke pipes with a power of 4,0 MW and an 80% efficiency. Finally, one of the objectives is to compare the selected fans with the fans that the company actually use in the boiler.

In a first phase the characterization of the selected biomass (wood sawmill) as well as the flow rate of fuel to feed the boiler. is determined. In order to quantify the rate of fuel, it was necessary to experimentally determine the lower heating value. The characterization was carried out based on ultimate and proximate analysis and with this results, the amount of air that the fans provided for the combustion reaction was calculated by two methods.

By method 1 the stoichiometric air flow rate is calculated using the information from the elemental analysis of the sawmill and method 2, used by the company, uses an empirical expression developed for wood with a typical composition. For biomass-fired boilers such as firewood, excess air factors are used between 1,8 and 2. These values were considered throughout the work.

After the determination of the primary and secondary air flow rates that the fans provide to the boiler, the total air pressure losses from the exit of the fan to the entrance of the furnace are also determined. With these two parameters, air flow and pressure drop, selection of the best fan can be performed.

The obtained primary and secondary air flow rates are respectively 6795 m<sup>3</sup>/h and 3883 m<sup>3</sup>/ h and the values obtained for the total head losses in the primary and secondary air path correspond to the values of 504 and 190 mm c.a.

Using the characteristic curves of the primary and secondary air fans that the company SML installed in the boiler, the values of efficiency, of speed and power are 86%, 2935 rpm and 7,5 KW for the primary air fan and 82%, 2000 rpm and 2,2 KW for the secondary air fan.

The fans selected by the company SML were the MZ brand, the GR 560/2 model for the primary fan and the GR 500/2 model for the secondary fan.

The primary air fan (GR 560/2) is suitable for the requirements determined in the present work, but the secondary air fan (GR 500/2) is not the most suitable because it will operate at the minimum speed value.

# Índice

<b>Capítulo 1 – Introdução</b> .....	1
1.1. Contextualização do Problema .....	1
1.2. Objetivos do Trabalho.....	6
1.3 História da Empresa Silvino Lindo – Ibérica S.A .....	7
<b>Capítulo 2 - Biomassa e Geradores de Vapor</b> .....	9
2.1. A Biomassa .....	9
2.1.1 Biocombustíveis Sólidos.....	10
2.1.2 Principais Propriedades da Biomassa .....	13
2.1.3 Tecnologias da Biomassa.....	15
2.1.4 O Processo de Combustão da Biomassa .....	17
2.2. Geradores de vapor.....	20
2.2.1 Classificação de Geradores.....	21
2.2.2 Tipos de geradores de calor .....	24
2.3 Equipamentos e Dispositivos Auxiliares.....	28
2.3.1 Acessórios.....	32
<b>Capítulo 3 – Ventiladores – Seleção do sistema de ventiladores para uma caldeira a biomassa</b> .....	37
3.1 Classificação de Ventiladores.....	37
3.1.1 Ventiladores Axiais .....	38
3.1.2 Ventiladores Centrífugos .....	38
3.2 Tiragem .....	39
3.2.1 Tiragem Natural.....	39
3.2.2 Tiragem Forçada .....	40
3.2.3 Tiragem Induzida.....	41
3.2.4 Tiragem Balanceada.....	42
3.3 Sistemas de Ventilação – Ar Primário, Secundário e Terciário .....	43
3.4 Curvas Caraterísticas dos Ventiladores.....	44
3.5 Determinação do caudal de ar e das perdas de carga .....	46
<b>Capítulo 4 – Resultados e Discussão</b> .....	57
4.1 Caso de Estudo .....	57
4.2 Caraterização da Biomassa.....	63
4.3 Determinação do caudal de ar a fornecer à caldeira.....	66
4.4 Perda de carga nas condutas e Seleção dos ventiladores.....	68
<b>Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos Futuros</b> .....	73
<b>Bibliografia</b> .....	75

<b>Anexos</b> .....	I
Anexo A.1 – Ensaio relativo à caracterização da biomassa.....	I
Anexo A.2 – Exemplos de cálculo da caracterização da biomassa .....	III
Anexo A.3- Exemplos de cálculo para a determinação do caudal volumétrico de ar .V	
Anexo A.4- Exemplos de cálculo para o dimensionamento de ventiladores .....	VII
Anexo B.1 – Norma Teor de Humidade.....	XXIII
Anexo B.2 – Norma Teor de Cinzas .....	XXIV
Anexo B.3 – Norma Determinação Poder Calorífico.....	XXV

## Índice de figuras

Figura 1. 1- Gráfico que representa a percentagem dos biocombustíveis sólidos para a produção de energias renováveis em Portugal [4]. .....	3
Figura 1. 2-Esquemática do ciclo de carbono para duas situações distintas: lado esquerdo representa o ciclo de carbono numa petrorrefinaria e o lado direito o ciclo de carbono numa Biorrefinaria [5]......	4
Figura 1. 3- Fotografia da empresa SML - Silvino Lindo Ibérica - S.A [11]. .....	7
Figura 2. 1- Distribuição das áreas totais por espécie/grupo de espécies no ano de 2013 pelo ICNF. ....	10
Figura 2. 2- Representação de diferentes biocombustíveis em que a) lenha, b)estilha c)pellets d)briquetes [8].	11
Figura 2. 3- Esquema do processo de produção de pellets e briquetes [8]	12
Figura 2. 4- Esquema ilustrativo das conversões termoquímicas quanto às tecnologias, produtos, potencialidades e respetivos usos [9].	15
Figura 2. 5- Esquema ilustrativo dos produtos obtidos pelo processo de digestão anaeróbia [8].	16
Figura 2. 6- Esquema ilustrativo do processo termoquímico da gasificação para baixas e altas temperaturas [11].	17
Figura 2. 7- Gráfico representativo de uma partícula de pequenas dimensões de biomassa nas diferentes etapas da combustão ao longo do tempo [9].	18
Figura 2. 8-Esquema representativo do que apresenta a câmara de combustão.	22
Figura 2. 9-Diagrama representativo dos diferentes tipos de grelhas de acordo com as suas especificações.	22
Figura 2. 10- Diagrama representativo dos diferentes tipos de materiais de construção para as caldeiras.	23
Figura 2. 11-Diagrama representativo das diferentes pressões de funcionamento e a respetiva gama de pressões.	24
<i>Figura 2. 12- Representação esquemática de uma caldeira horizontal de tubos de fumos e sua respetiva legenda [10]. 1-Corpo do gerador de vapor, 2- fornalha, 3 – Caixa de reversão, 4- Tubos de fumos de 2 passagens, 5 – tubos de fumos de 3 passagens, 6 – Caixa de fumos, 7 – Saída dos gases, 8 – Monómetro, 9 – Válvula de segurança, 10 – Controlador de nível, 11 – válvula geral de vapor, 12 – Queimador, 13- Ventilador, 14- Quadro elétrico de comando, 15 – bomba de alimentação de água (2 grupos eletrobomba ou 1 grupo e 1 injetor manual), 16- Estrado de assentamento, 17- Válvula de purga, 18 – isolamento em lã mineral.</i>	25
Figura 2. 13- Esquema de uma caldeira aquotubular de circulação natural (tipo Babcock) [9].	26
Figura 2. 14- Esquema de um gerador aquotubular de circulação forçada [9].	27
Figura 2. 15- Esquema ilustrativo dos componentes que fazem parte de um sistema de geração de calor com alimentação a biomassa.	29
Figura 2. 16– Exemplo de montagem de uma grelha plana de alimentação inferior por um parafuso sem-fim em cadeiras de tubos de fumo [9].	30
Figura 2. 17- Sistema de armazenagem, alimentação e queima de combustível sólido granulado em grelha plana de alimentação inferior por parafuso sem-fim [9]	31
Figura 2. 18 Exemplo de três tipos de válvulas de corte. Válvulas de macho esférico, cunha e borboleta (da esquerda para a direita respetivamente) [15].	32

Figura 2. 19- Exemplo de válvulas de retenção, equilibradoras, manutenção de pressão diferencial (fila superior) e de segurança e controlo (fila inferior).	33
Figura 2. 20- Imagem representativa de uma das bombas de calor implementadas numa casa de caldeiras. Bomba centrífuga Marca Grundfos e Modelo NK 150-315.	33
Figura 2. 21- Exemplo de um indicador de nível utilizado para um gerador de vapor [19].	34
Figura 2. 22- Representação esquemática do funcionamento de um injetor implementado numa caldeira.	34
Figura 3. 1- Exemplo de um ventilador do tipo axial [18].	38
Figura 3. 2- Exemplo de um ventilador centrífugo [18].	38
Figura 3. 3 Representação esquemática da tiragem natural [19].	39
Figura 3. 4 -Exemplo de esquema ilustrativo de uma caldeira com ventilador de tiragem forçada.	40
Figura 3. 5- Exemplo de um ventilador de tiragem forçada utilizado numa casa das caldeiras.	41
Figura 3. 6- Representação esquemática da tiragem induzida [19].	41
Figura 3. 7- Representação esquemática da tiragem balanceada [19].	42
Figura 3. 8- Localização do ventilador de ar primário, ar secundário e ar terciário generalizada num ventilador vertical de tubo de fumos em Auto Cad.	44
Figura 3. 9- Curva característica, $Q_{ar} \times P_t$ , para os diferentes tipos de ventiladores [18]	45
Figura 3. 10- Curva característica, $P_{total} \times Q_{ar}$ , de um ventilador que opera em rotação constante [18].	45
Figura 3. 11- Diagrama de Moody para escoamento laminar e turbulento [27].	53
Figura 3. 12- Diferentes valores de K para diferentes acessórios e para tubagens onde ocorre expansões ou estrangulamentos.	56
Figura 4. 1 -Representação fotográfica dos três ventiladores utilizados na caldeira de tubo de fumos de 4,0 MW. Encontram-se representados o ar primário, secundário e terciário respetivamente.	57
Figura 4. 2- Percurso por onde o ar primário percorre desde a saída do ventilador primário até à entrada da grelha no interior da fornalha da caldeira em Auto Cad 1-Saída do Ventilador, 3- Curva/Saída do coletor, 4-Válvula Borboleta, 5-Tubo de diâmetro 0,150 metros, 6- Curva de diâmetro 0,150 metros, 7 – Tubo Retangular, 8 – Curva Retangular 0,150x0,150, 9 – Tubo Retangular, 10 – Grelha:	59
Figura 4. 3 Percurso onde o ar primário percorre desde a saída do ventilador primário passando por duas entradas no interior do coletor em Auto Cad.	59
Figura 4. 4 Percurso do ar primário desde a saída do coletor até à saída da grelha momentos antes de entrar na fornalha em Auto Cad.	60
Figura 4. 5- Caldeira tubo de fumos de potência 4,0 MW e respetiva localização do ventilador secundário em Auto Cad.	60
Figura 4. 6- Visualização dos tubos de 0,052 metros de diâmetro onde sai o ar secundário e os tubos de ar terciário de maior comprimento.	62
Figura 4. 7- Representação do percurso do ar secundário (ventilador GR 50) onde é possível visualizar a presença de 24 tubos de 0,052 metros de diâmetro em Auto Cad.	62
Figura 4. 8- Curva Característica para o caudal de ar primário igual a 6795 m <sup>3</sup> /h e perda de carga total igual a 504 mm.c.a do ventilador GR 560/2.	69

Figura 4. 9- Curva Caraterística para o caudal de ar secundário igual a 3883 m<sup>3</sup>/h e perda de carga total igual a 190 mm.c.a do ventilador GR 500..... 71

## Índice de tabelas

Tabela 1. 1- Consumo da energia primária por fonte de energia e região em 2006, PJ/ano [3]. .....	4
Tabela 2. 1- Tabela relativa ao tipo de forma, posição dos tubos e conteúdo dos tubos. ....	23
Tabela 2. 2 Classificação das válvulas mecânicas de acordo com a função, variável a medir e a sua atuação. ....	32
Tabela 3. 1 Classificações e respetivas especificações dos diferentes tipos de ventiladores de acordo com o número de estágios existentes [17]. ....	37
Tabela 3. 2- Quantidade mássica (kg) do carbono e do oxigénio dando dióxido de carbono como gás de formação da reação de combustão. ....	47
Tabela 3. 3- Volumes (condições PTN) de oxigénio (O <sub>2</sub> ), dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), azoto (N <sub>2</sub> ) e o ar estequiometricamente necessário e gases após a combustão completa de 1 kg de carbono. Nota: considerou-se válida a adição de volumes. ....	47
Tabela 3. 4- Quantidade mássica (kg) do hidrogénio e do oxigénio originando água e azoto como gás de formação da reação de oxidação. ....	48
Tabela 3. 5- Quantidade mássica (kg) de enxofre e de oxigénio originando dióxido de enxofre e azoto como gás de formação da reação de oxidação. ....	48
Tabela 3. 6- Coeficientes de atrito de Hazen Williams [26]. ....	54
Tabela 3. 7- Coeficiente de carga, K, para acessórios de tubulação escolhidos [25] ..	55
Tabela 3. 8-Diferentes valores de coeficiente de carga, ka, para os diferentes ângulos de abertura da válvula borboleta [29]. ....	56
Tabela 4. 1- Dimensões e comprimento das tubagens e acessórios do percurso do ar primário.....	58
Tabela 4. 2- Dimensões e comprimento das tubagens e acessórios do percurso do ar secundário. ....	61
Tabela 4. 3- Valores obtidos do teor de humidade das réplicas 1, 2 e seu valor médio comparativamente com o valor empírico do teor de humidade (%) e desvio relativo (%). ....	63
Tabela 4. 4- Valores obtidos do teor de cinzas das réplicas 1, 2 e seu valor médio comparativamente com o valor empírico do teor de cinzas (%) e desvio relativo (%). ....	63
Tabela 4. 5 Valores médios obtidos para a determinação do poder calorífico superior das duas réplicas (cal/g e kJ/kg). ....	64
Tabela 4. 6- Resultados dos ensaios de determinação do TC e TOC. ....	65
Tabela 4. 7- Composição da análise elementar realizada aos compostos C (carbono), H hidrogénio), N (azoto), S (enxofre), O (oxigénio) e Cl (cloro) em percentagem (% m/m). ....	66
Tabela 4. 8- Valores da potência consumida (MW), do rendimento admitido pela caldeira (%), PCI (cal/g) e a massa de combustível utilizado para a reação de combustão (kg) que ocorre na caldeira. ....	66
Tabela 4. 9- Resultados dos cálculos intermédios para a obtenção em base volumétrica dos diferentes compostos presentes na reação de combustão. ....	67

Tabela 4. 10- Valores obtidos para a o caudal molar do oxigénio e os caudais mássico e volumétrico do ar. ....	67
Tabela 4. 11- Resultados obtidos de caudal de ar primário (m <sup>3</sup> /h) e perda de carga (mm.c.a) de cada um dos acessórios e das tubagens para o dimensionamento do ventilador primário. ....	68
Tabela 4. 12 - Resultados obtidos de caudal de ar secundário (m <sup>3</sup> /h) e perda de carga (mm.c.a) de cada um dos acessórios e das tubagens para o dimensionamento do ventilador secundário.....	70

Tabela A. 1 - Conjunto de resultados relativos à medição do teor de humidade da biomassa antes e depois de se ter submetido na estufa a 105°C segundo a norma NREL/TP-510-42621 das duas réplicas.....	I
Tabela A. 2- Conjunto de resultados relativos à medição do teor de cinzas da biomassa antes e depois de se ter submetido na mufla a 575°C segundo a norma NREL/TP-510-42622 das duas réplicas. ....	I
Tabela A. 3- Valores obtidos do ensaio realizado para a determinação do poder calorífico superior (PCS) para as duas réplicas. Registo dos valores da massa de biomassa antes de serem colocadas na bomba calorimétrica e registo dos valores do PCS obtido em cal/g e kJ .....	II
Tabela A. 4- Valores obtidos para a dimensão (m), comprimento (m), área (m), caudal (m <sup>3</sup> /h e m <sup>3</sup> /s) e velocidade (m/s) dos diferentes equipamentos presentes no percurso do ar primário. ....	VII
Tabela A. 5- Cálculo da pressão dinâmica (mmca), do coeficiente de perda de carga (K) dos acessórios, do fator de perda de carga segundo Darcy para as tubagens (f), Reynolds (Re) e a rugosidade relativa da tubagem. ....	XI
Tabela A. 6- Valores relativos do ângulo de abertura e respetivo coeficiente de perda de carga associado ao ângulo de abertura da válvula borboleta.....	XIV
Tabela A. 7- Valores obtidos para a dimensão (m), comprimento (m), área (m), caudal (m <sup>3</sup> /h e m <sup>3</sup> /s) e velocidade (m/s) dos diferentes equipamentos presentes no percurso do ar secundário.....	XVI
Tabela A. 8- Cálculo da pressão dinâmica (mmca), do coeficiente de perda de carga (K) dos acessórios, do fator de perda de carga segundo Darcy para as tubagens (f), Reynolds (Re) e a rugosidade relativa da tubagem. ....	XX

## Nomenclatura

$\alpha$  – Ângulo de abertura

$\varphi$  – Razão de equivalência

e – Coeficiente de excesso de ar

$\varepsilon$  – Rugosidade efetiva do tubo

$\eta$  – Rendimento

$\eta_g$  – Rendimento do gerador de vapor

$\mu$  – Viscosidade aparente do fluido.

(AC)estequiométrico – Razão ar/combustível estequiométrico

(AC)real – Razão ar/combustível real

Cf – Coeficiente de atrito de Hazen – Williams

CO – Monóxido de carbono

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

Di – Diâmetro Interno

DN – Diâmetro Nominal

E – Excesso de ar

f – Fator de atrito de Fanning

ICNF – Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas

K – Coeficiente de perda de carga nos acessórios

L- Calor latente de vaporização da água

Le – Comprimento equivalente do tubo

$m_{ar}$  – Massa de ar

$m_{água}$  – Massa de água

$m_{gás}$  – Massa de gás

$m_{hum}$  – Massa de ar húmido

$m_c$  – Massa de combustível

M – Humidade

MM<sub>O<sub>2</sub></sub> – Massa Molar do Oxigénio

MM<sub>N<sub>2</sub></sub> – Massa Molar do Azoto

n- Fator de Excesso

$n_0$  – Caudal molar de ar

$\rho_{\text{ar}}$  – Massa volúmica do ar

PCI – Poder calorífico inferior

PCS – Poder calorífico superior

$Q_{\text{ar}}$  – Calor sensível do ar seco

Re - Reynolds

$T_R$  – Temperatura de referência

v – Velocidade média do fluido

$V_{\text{teórico,ar}}$  – Volume teórico ou estequiométrico de ar

$V_{\text{real,ar}}$  – Volume real de ar

## Capítulo 1 – Introdução

### 1.1. Contextualização do Problema

#### **A descoberta dos combustíveis fósseis**

A utilização exponencial dos combustíveis fósseis desde a revolução industrial tem vindo a desempenhar um papel ativo na área de desenvolvimento económico, social e tecnológico fazendo deste tipo de recursos não renováveis uma mais-valia para satisfazer as necessidades energéticas de todo o mundo [1].

O grande recurso não renovável e igualmente considerado como combustível fóssil descoberto por volta do século XIX que revolucionou todo o setor industrial e energético foi o petróleo e com ele conseguiu-se obter uma variedade de combustíveis com diferentes características a partir da sua refinação [2].

Assim, a petrorrefinaria permitiu o aparecimento de novos combustíveis que fossem capazes de transformar a energia química em outro tipo de energia, o que levou à continuação da existência humana e posteriormente ao seu desenvolvimento. Esse desenvolvimento fez com que fosse possível realizar certas atividades do quotidiano como por exemplo aquecer água e até mesmo cozinhar através da energia térmica obtida pelo aparecimento de combustíveis. De notar que a energia térmica (ou elétrica) é conseguida pela existência de equipamentos capazes de transformar a energia química dos combustíveis em energia mecânica. A transformação química contida nos combustíveis é caracterizada pela elevada densidade energética e pela enorme capacidade de armazenamento, o que permitiu o rápido avanço principalmente na área dos transportes [2].

Mas para além destes aspetos existem outros tantos que possibilitaram o melhoramento das condições de vida da sociedade. Toma-se como exemplo muito prático o aparecimento da eletricidade com o surgimento das centrais de energia elétrica alimentadas por derivados de petróleo e carvão [2]. Porém, a sua excessiva utilização não trouxe somente benefícios.

A importância da utilização de recursos não renováveis é evidente quanto ao seu potencial energético, mas a realidade é que os combustíveis fósseis são escassos na natureza, não se encontram com facilidade devido ao fato de não serem fáceis de adquirir e as reservas de petróleo, gás natural e carvão começaram a esgotar-se ao longo do tempo. A verdade é que aquando a descoberta dos combustíveis fósseis, gerou-se um incremento na necessidade dos países desenvolvidos utilizarem este potencial energético e como consequência fez com que existisse um aumento brutal da poluição [1].

Como exemplo tem-se vindo a verificar o aumento da poluição atmosférica que contribui para o aumento do *efeito de estufa*, intensificação das chuvas ácidas e ainda a intensificação das *alterações climáticas*. [1].

### **Alternativas mais sustentáveis: o aparecimento da biomassa.**

Face ao problema ambiental originado pela excessiva utilização dos combustíveis fósseis, o Homem viu-se obrigado a criar alternativas limpas e ecológicas com a mesma densidade energética como do petróleo se tratasse. A sociedade começou a olhar para os resíduos que gerava de uma maneira mais energética de modo a substituir o petróleo, o carvão e o gás natural por resíduos agrícolas, restos de óleos de cozinha, e até mesmo por plantações energéticas.

Em alternativa, começou-se por fazer uma seleção prévia dos resíduos oriundos da ação humana e concluiu-se que esta grande maioria eram caracterizadas por serem recursos renováveis.

Assim sendo, estes resíduos comparativamente com os recursos não renováveis são: facilmente obtidos na superfície terrestre, abundantes e ainda apresentam elevados valores energéticos que são semelhantes quando comparados com os combustíveis fósseis. Embora não seja totalmente eficaz a sua não emissão de gases poluentes para a atmosfera, há uma redução substancial quando ocorre a queima de biomassa sendo que estes gases fazem parte do ciclo de carbono existente nas plantas que deram origem à biomassa.

A biomassa mais utilizada tem sido os desperdícios da indústria da madeira e o motivo pela qual se tem vindo a utilizar deve-se a sua facilidade de compressão e de expansão, por ser altamente energético, altamente rentável e ainda ser capaz de diminuir a emissão de gases que contribuem para o aumento do efeito de estufa. Este tipo de resíduos podem ser sob a forma de pellets, pontas e ramos de árvores, cascas de árvores e ainda de serraduras e lenha [2].

#### **Bioenergia e o ciclo de carbono**

O biocombustível é considerado fonte de energia uma vez que, este é obtido diretamente através de variados processos onde a biomassa contém a energia armazenada. Como todo este processo é de origem biológica então pode-se chamar a energia obtida como bioenergia. Em suma, *“os biocombustíveis podem ser considerados como forma de energia renovável desde que sejam baseadas numa produção sustentável de biomassa”* [3].

A figura 1.1 apresenta o gráfico que caracteriza a percentagem dos biocombustíveis sólidos como alternativa de produção de energias renováveis entre os anos de 1970 e 2015.

Share of Solid biofuels in Renewables production (%)

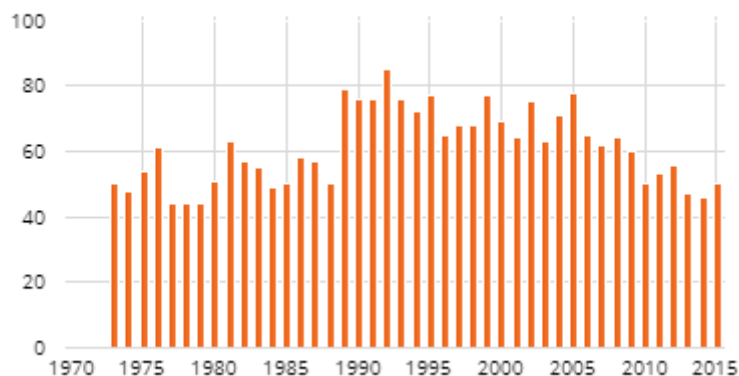


Figura 1. 1- Gráfico que representa a percentagem dos biocombustíveis sólidos para a produção de energias renováveis em Portugal [4].

Em Portugal verifica-se um aumento da percentagem de biocombustíveis sólidos para a produção de energias renováveis ao longo dos anos, contudo verificou-se um decréscimo entre o ano de 2010 e o ano de 2015 (60% para 45%). O pico de produção deu-se entre os anos de 1990 e 1995 onde a percentagem de biocombustíveis sólidos rondava os 80%.

Face ao estado atual da bioenergia em várias regiões do mundo verifica-se que a taxa da biomassa em países desenvolvidos é muito pequena comparativamente com os países em desenvolvimento onde cerca de 22% da energia produzida advém da biomassa. [3].

A tabela 1.1 representa o consumo da energia primária por fonte de energia e região.

Tabela 1. 1- Consumo da energia primária por fonte de energia e região em 2006, PJ/ano [3].

	Modern biomass	Traditional biomass	Other renewables	Conventional energy	Total primary energy	Modern biomass as % of primary energy
<b>World</b>	<b>16,611</b>	<b>33,432</b>	<b>13,776</b>	<b>409,479</b>	<b>473,319</b>	<b>3.5%</b>
<b>OECD</b>	<b>8442</b>	<b>42</b>	<b>6783</b>	<b>222,369</b>	<b>237,636</b>	<b>3.6%</b>
OECD North America	4158	–	3276	112,959	120,393	3.5%
<i>US and Canada</i>	3801	–	2898	106,281	112,980	3.4%
<i>Mexico</i>	357	–	399	6678	7392	4.8%
OECD Pacific	882	42	798	36,561	38,283	2.4%
<i>OECD Asia</i>	504	42	525	31,374	32,445	1.6%
<i>OECD Oceania</i>	378	–	252	5208	5838	6.5%
OECD Europe	3402	–	2688	72,828	78,939	4.3%
<i>OECD Europe – EU</i>	3129	–	1785	69,384	74,298	4.2%
<b>Transition economies</b>	<b>693</b>	<b>–</b>	<b>1176</b>	<b>44,688</b>	<b>46,536</b>	<b>1.5%</b>
Russia	273	–	672	26,901	27,867	1.0%
<b>Developing countries</b>	<b>7434</b>	<b>33,432</b>	<b>5817</b>	<b>136,269</b>	<b>182,994</b>	<b>4.1%</b>
China	315	8988	1323	49,602	60,144	0.5%
East Asia	1092	3633	1197	20,202	26,145	4.2%
<i>Indonesia</i>	126	1680	357	5418	7560	1.7%
South Asia	1302	9828	504	18,627	30,261	4.3%
<i>India</i>	1092	8043	357	15,582	25,074	4.4%
Latin America	2394	1239	2373	15,834	21,840	11.0%
<i>Brazil</i>	1680	357	1176	5502	8736	19.2%
Middle East	21	63	105	19,341	19,551	0.1%
Africa	2310	9702	315	12,726	25,074	9.2%

Note: OECD = Organisation for Economic Co-operation and Development.

Source: Interpolated from data in [3], other renewables includes solar, wind, hydro, geothermal, wave and ocean energy; conventional energy includes coal, oil, gas and nuclear energy.

A figura 1.2 representa a imagem ilustrativa do ciclo de carbono para duas situações. A situação do lado esquerdo representa o ciclo de carbono numa petrorrefinaria e a situação do lado direito representa o ciclo de carbono para a Biorrefinaria.

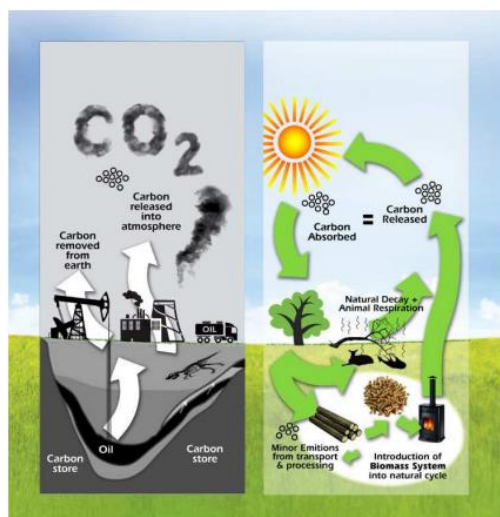


Figura 1. 2-Esquematização do ciclo de carbono para duas situações distintas: lado esquerdo representa o ciclo de carbono numa petrorrefinaria e o lado direito o ciclo de carbono numa Biorrefinaria [5].

Na petrorrefinaria, o ciclo de carbono nunca chega efetivamente a realizar-se devido à queima de combustíveis fósseis uma vez que a quantidade de carbono libertada no momento da queima é maior do que a sua regeneração. No caso de uma situação onde ocorre a queima de biomassa isso já não se verifica pois a biomassa de

origem vegetal como as plantas e as árvores absorvem o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) da atmosfera, por processos fotossintéticos, armazenando na sua estrutura celular. No momento da sua queima, a biomassa devolve para a atmosfera o dióxido de carbono libertado que juntamente com o crescimento de novas plantas e de árvores o dióxido de carbono libertado é novamente capturado tornando o ciclo de carbono atmosférico em equilíbrio [5].

Para que o ciclo de carbono não seja alterado e mantido em equilíbrio é necessário que haja uma gestão sustentável da biomassa e que esta seja igualmente regenerada para se dar continuidade ao ciclo.

### **Combustão**

A combustão é a tecnologia intrínseca para a produção de bioenergia que representa cerca de 90% da energia utilizada a nível mundial. Todavia, ao fazer a seleção da biomassa deve-se ter em atenção as características do combustível a ser usado, a legislação em vigor na localidade onde é feita a combustão, os custos e a própria performance do equipamento necessário, a energia e a capacidade disponível como energia elétrica e energia térmica.

De acordo com o tipo de processo termoquímico utilizado para a combustão devem ser implementados especiais cuidados quanto ao tipo de pré-tratamento e ao tipo de tratamentos de purificação a que a biomassa pode vir a ser submetida para que o combustível formado apresente máxima qualidade possível [3].

## 1.2. Objetivos do Trabalho

O objetivo da presente tese passa pela seleção de dois ventiladores de tiragem forçada para uma caldeira de tubo de fumos com potência igual a 4,0 MW e rendimento de 80% concebida pela empresa SML. Um outro objetivo passa pela experiência de trabalhar diretamente numa empresa onde lida diariamente com o dimensionamento e a projeção de peças industriais para outras empresas.

É ainda objetivo a comparação entre os ventiladores selecionados com os ventiladores efetivamente instalados na caldeira.

A caldeira de tubo de fumos é alimentada com uma biomassa específica que é o serrim de madeira, e uma das principais propriedades que este tipo de biomassa apresenta é o seu alto poder calorífico o que leva à produção de grandes quantidades de energia.

Para cumprir os objetivos foi necessário determinar a quantidade de ar necessária à reação de combustão e a determinação das perdas de carga que o ar realiza desde a saída do ventilador até à fornalha da caldeira.

### 1.3 História da Empresa Silvino Lindo – Ibérica S.A

Em 1987, Silvino Moreira Lindo, principal entidade que conduziu ao momento da construção da empresa, inicia a sua atividade de apoio a pequenas e médias empresas produtoras de mobiliário nos campos de aquecimento industrial, redes de ar comprimido e redes de incêndio mas foi no ano de 1990 que com o apoio dos seus clientes, decide criar a então **SML – Silvino Lindo, Indústria de Secadores de Madeira, Lda.**

Deste modo, a empresa abriu o seu leque de conceção e de momento tem como principal atividade a conceção, fabrico e instalação de equipamentos para secagem de madeiras e para linhas de acabamento da indústria de mobiliário. É de salientar que as instalações de secagem de madeiras estão preparadas tanto para a secagem como para o tratamento de madeiras, pellets e madeira de embalagem.

De forma a proporcionar aos seus clientes todos os sistemas que sejam necessários ao funcionamento das respetivas unidades fabris, Silvino Lindo proporcionou a otimização e criação de equipamentos como caldeiras (alimentadas a biomassa, diesel, gás), sistemas de aspiração, filtros (via seca e via húmida), silos equipados de extratores automáticos, circuitos de ar comprimido, entre outros. Esta multiplicidade levou ao crescimento exponencial da empresa que de momento *“é possuidora de 90% do mercado português e grande parte do mercado espanhol. [6]”*. A figura 3.1 retrata o aspeto exterior por via satélite da empresa.



Figura 1. 3- Fotografia da empresa SML - Silvino Lindo Ibérica - S.A [11].

Além do mercado português, a empresa tem conseguido ao longo dos 30 anos de existência uma elevada internacionalização de todos os seus produtos desenvolvidos nos mercados exteriores. Para finalizar, no ano de 2009, a empresa passou-se então a designar-se de **Silvino Lindo Ibérica, S.A** oferecendo *“aos clientes projetos em que a sua conceção técnica do produto passando pelo fabrico, montagem e formação até ao serviço pós venda dos equipamentos instalados”*.



## Capítulo 2 - Biomassa e Geradores de Vapor

### 2.1. A Biomassa

De acordo com a legislação obtida pela União Europeia (EU), a biomassa apresenta-se de acordo com a Diretiva (2009/28/CE) como “a fração biodegradável de produtos, resíduos e detritos de origem biológica provenientes da agricultura (incluindo substâncias de origem vegetal e animal), da exploração florestal e de indústrias afins, incluindo da pesca e da aquicultura, bem como a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos” e divide-se em três grupos quanto à sua origem [1]:

- **Biomassa Natural:** Matéria produzida pela natureza sem qualquer tipo de intervenção humana (ex: animais, vegetação, árvores, entre outros).
- **Biomassa de Plantações Energéticas:** Proveniente do cultivo de plantas com finalidade de produzir a biomassa pretendida (ex: cana comum, salgueiro e outras espécies lenhosas).
- **Biomassa residual:** Todo o resíduo gerado por qualquer tipo de atividade humana (ex: resíduos florestais e agrícolas, resíduos sólidos urbanos, resíduos domésticos, entre outros).

Para além de se classificar a biomassa pela origem também se pode classificar igualmente em três tipos: líquida, gasosa e sólida.

- **Biocombustíveis Líquido:** Obtém-se biocombustíveis líquidos com origem em culturas energéticas. Como exemplo, o biodiesel é obtido a partir de óleos de girassol ou de colza [5], o etanol é obtido a partir da fermentação de açúcares, amido e celulose que se encontram presentes nas culturas da cana-de-açúcar e o metanol, que é um produto resultante da síntese do gás natural ou do processo de gasificação da madeira [7].
- **Biocombustível Gasoso:** O gás de aterro ou gás de produção são resíduos resultantes da degradação biológica anaeróbia da matéria orgânica. Apresentam na sua constituição uma mistura de metano (CH<sub>4</sub>) (50% a 70 %) e CO<sub>2</sub>. Estes tipos de resíduos tem origem nos efluentes agropecuários, agroindustriais e ainda nos aterros de resíduos sólidos urbanos [7].
- **Biomassa Sólida:** São os resíduos e produtos de atividades como a agricultura (inclusive a atividade animal e vegetal), resíduos florestais e representa uma fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos [5].

O tipo de biomassa que será abordado no decorrer de todo o trabalho será a biomassa sólida e o elemento que será estudado com maior pormenor dentro dos resíduos sólidos serão os resíduos provenientes das indústrias transformadoras da madeira.

## 2.1.1 Biocombustíveis Sólidos

Seguidamente será abordado com maior importância os resíduos florestais como fonte de combustível para alimentar equipamentos industriais e domésticos (por exemplo salamandras, geradores e caldeiras).

### ✓ Resíduos Florestais

Os resíduos florestais, como o próprio nome indica, são resíduos que se destacam por ter três origens distintas: o material oriundo da colheita florestal, os resíduos que são gerados pela indústria durante o processamento da madeira, obtendo-se licores, negros para a pasta de papel, aparas, estilhas e ainda os resíduos originários de culturas energéticas.

Este tipo de biomassa, sólido, apresenta na sua constituição elementos importantes como a celulose, hemicelulose e ainda a lenhina. A lenhina é o elemento que, de acordo com as suas propriedades, torna os combustíveis mais suscetíveis para converter biomassa em bioenergia. Existe uma vasta gama de espécies florestais com diferentes composições químicas e as propriedades básicas deste tipo de biomassa não são uniformes [1].

A figura 2.1 apresenta a diversidade, em termos percentuais, da área florestal por espécie ou por um conjunto de espécies em Portugal no ano de 2013.

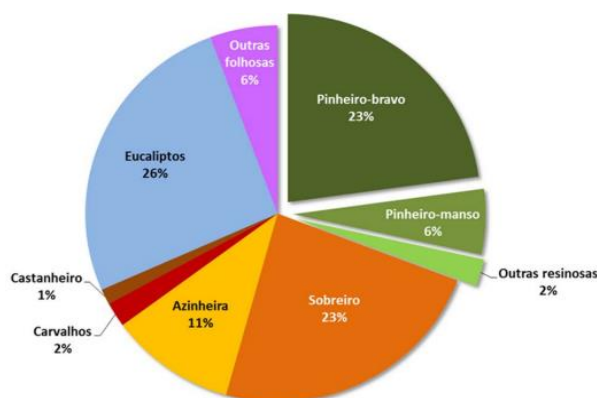


Figura 2. 1- Distribuição das áreas totais por espécie/grupo de espécies no ano de 2013 pelo ICNF.

É possível verificar que a diversidade de espécies florestais existentes em Portugal é elevada, contudo espécies como os Eucaliptos e os Pinheiros-bravos são as que apresentam maior relevo comparativamente com as restantes espécies. Apesar de existirem diferentes espécies e todas elas exibirem composições e características diferentes, no que respeito às propriedades da biomassa os valores são mais semelhantes quando comparados com os do petróleo e do carvão. O poder calorífico superior dos combustíveis fósseis e da biomassa, após um processo de pré-tratamento, são muito idênticos, concluindo assim que os resíduos florestais são sem dúvida uma alternativa viável devido à sua elevada densidade energética [1].

Como exemplo, encontram-se os pellets e briquetes que são resíduos trabalhados e modificados dos resíduos florestais e são os mais utilizados para a produção de energia nas diferentes indústrias.

✓ Pellets e briquetes

As pellets e os briquetes são constituídos essencialmente por serrim que é o resultado da moagem da estilha de madeira e da moagem de outros desperdícios da indústria de transformação da madeira. Quanto ao que distingue as pellets dos briquetes, pode-se afirmar que as pellets são caracterizadas pela sua dimensão reduzida e forma cilíndrica. Os briquetes apresentam maior dimensão e são igualmente cilíndricos com um furo centrado de topo a topo [1].

A figura 2.2 representa diferentes formas de apresentação da madeira como combustível.



*Figura 2. 2- Representação de diferentes biocombustíveis em que a) lenha, b)estilha c)pellets d)briquetes [8].*

Para obter a forma pretendida da madeira é necessário recorrer a um conjunto de etapas sendo as principais a moagem, secagem e prensagem que, posteriormente darão origem a um produto final com uma elevada densidade e com baixo teor de humidade.

O processo de produção de pellets encontra-se representado pelo esquema da figura 2.3.

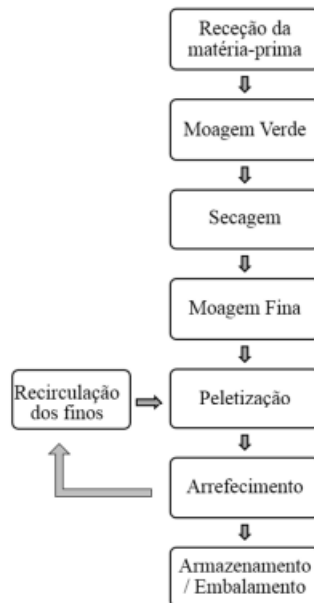


Figura 2. 3- Esquema do processo de produção de pellets e briquetes [8]

No decorrer do processo a matéria-prima ao chegar às instalações sofre um conjunto de etapas com a finalidade de alcançar o produto desejado. Primeiramente ocorre a moagem do material onde o objetivo é a diminuição da granulometria da matéria-prima e, de seguida, é efetuada a secagem para ajustar o teor de humidade. Este processo pode ser efetuado por via natural ou com secadores: processo de secagem natural que tem como principal vantagem um custo energético reduzido. No entanto apresenta como desvantagem um tempo de secagem demasiado elevado tornando-se difícil de controlar este mesmo tempo de secagem.

Na etapa da moagem fina o objetivo é uniformizar a granulometria do serrim pois este é um fator importante que influencia a densidade do pellet. Posteriormente dá-se a etapa da peletização do material onde ocorre prensagem da biomassa com o auxílio de rolos. De seguida dá-se a extrusão através de uma matriz perfurada e à saída da matriz, a biomassa é prensada e cortada por facas ajustadas de forma a obter as dimensões finais pretendidas. O processo de peletização ocorre a altas temperaturas (110-130°C) e no momento da prensagem, pode chegar até pressões elevadas e é igualmente influenciado pelo atrito provocado pelos rolos sobre a matriz da biomassa. As altas temperaturas que se geram ao longo de todo o processo ajudam na coesão das partículas e tornam a lenhina um material com propriedades altamente plastificantes. Por vezes, são adicionados aditivos de colagem natural, como o milho, para ajudar no processo de prensagem melhorando a resistência dos pellets.

Após todas estas etapas, dá-se a etapa do arrefecimento para que ocorra o endurecimento da biomassa e para que os pellets voltem a adotar a sua forma rígida. Pode eventualmente acontecer que, a produção de quantidades significantes de finos leve à peneiração dos pellets e os finos sejam novamente reencaminhados para a fase de peletização. Finalmente, os pellets são armazenados em silos, embalados em sacos ou em big-bags. O seu armazenamento deve ser efetuado num local seco de modo a aumentar o seu tempo de vida e de modo a não ganhar qualquer tipo de humidade [8].

A utilização deste tipo de resíduos é uma mais-valia pois apresentam condições ótimas de baixo custo de utilização e tamanho que proporciona a facilidade de transporte, processamento e de armazenamento [1].

### 2.1.2 Principais Propriedades da Biomassa

Na seleção da tecnologia para converter a biomassa em bioenergia é necessário definir quais são os principais parâmetros da biomassa a ter em conta. Deste modo são apresentados os seguintes parâmetros:

1. Densidade a Granel: A densidade a granel é uma propriedade que se encontra diretamente relacionada com custos de transporte e de armazenamento pois quanto maior for a densidade a granel maior é a possibilidade de reduzir os custos dos mesmos. A densidade granel é a razão entre a massa e o volume ocupado de um dado material, considerando a porosidade externa e interna do mesmo.
2. Densidade Aparente: A densidade aparente refere-se à massa média de um sólido por unidade de volume, isto é, representa a massa de um sólido granulado não considerando os espaços vazios entre os granulados. Deste modo é caracterizado por ser a densidade do sólido considerando apenas a sua porosidade interna.
3. Teor de Humidade: A biomassa natural apresenta elevados teores de humidade e por este motivo, a biomassa é submetida a um processo de secagem até se obter uma percentagem de humidade abaixo dos 15 % (teor de humidade recomendado pelos fabricantes dos equipamentos). O teor de humidade é um parâmetro importante pois influencia o comportamento de inflamação da biomassa e influencia igualmente o seu poder calorífico pois parte da energia do combustível é perdida devido à evaporação da água retida que fica indisponível para a sua utilização a nível energético. Quanto maior for a humidade na biomassa, menor será a durabilidade, maior será a densidade aparente e ocorrerá uma maior estimulação de crescimento de microrganismos como esporos e fungos [8].
4. Teor de Cinzas: O teor de cinzas é um parâmetro que influencia principalmente os equipamentos, nomeadamente na performance e limpeza de uma caldeira. Este parâmetro varia muito em função dos diferentes tipos de biomassa sólidas usadas no fabrico dos pellets, sendo que cascas e até algumas folhas conduzem a elevados teores de cinza. Infelizmente, as cinzas são um material abrasivo o que, a longo prazo, pode causar corrosão nos elementos metálicos dos queimadores. Os constituintes inorgânicos que mais contribuem para a formação de cinzas são o Si, Ca, Mg, K, Na, P, S, Cl, Al, Fe e Mn, que apresentam valores compreendidos entre 1% e 3%.
5. Poder Calorífico: Num combustível, o poder calorífico corresponde à quantidade possível de energia libertada, durante a combustão, por unidade de massa, sendo representado normalmente apresentado em MJ/kg (unidades S.I). Nos pellets, este parâmetro varia conforme a origem da biomassa utilizada como matéria-prima e conforme o teor de humidade presente.

6. Teor de Metais Alcalinos: é necessário avaliar o teor de metais alcalinos pois ao reagirem com outros constituintes das cinzas resultantes do processo de combustão da biomassa pode ocorrer a formação de um líquido que apresenta alta viscosidade e pode conduzir ao aparecimento de consequências negativas como por exemplo o entupimento das tubagens do tipo de equipamento que estiver a ser utilizado.
  
7. Carbono total: O carbono é quantificado com a utilização de um equipamento próprio capaz de quantificar todas as formas de carbono numa amostra. O carbono a analisar é o carbono total, ou seja, é a soma dos carbonos presentes nos compostos de carbono orgânico e inorgânicos presentes numa amostra, incluindo o carbono elementar.

### 2.1.3 Tecnologias da Biomassa

A escolha do tipo de processo de conversão é feita de acordo com alguns fatores como a disponibilidade da matéria-prima, a procura, a origem, entre outros fatores. No decorrer da presente tese será realizada uma breve abordagem aos diferentes processos de conversão dando principal destaque ao processo termoquímico mais utilizado: a combustão. Processos como a gasificação e a pirólise têm vindo a ser cada vez mais desenvolvidos e a apresentar alto destaque nas diferentes indústrias [3]. A figura 2.4 apresenta as diferentes tecnologias de conversão termoquímica: pirólise, gasificação, os produtos formados em termos industriais e o seu uso no quotidiano.

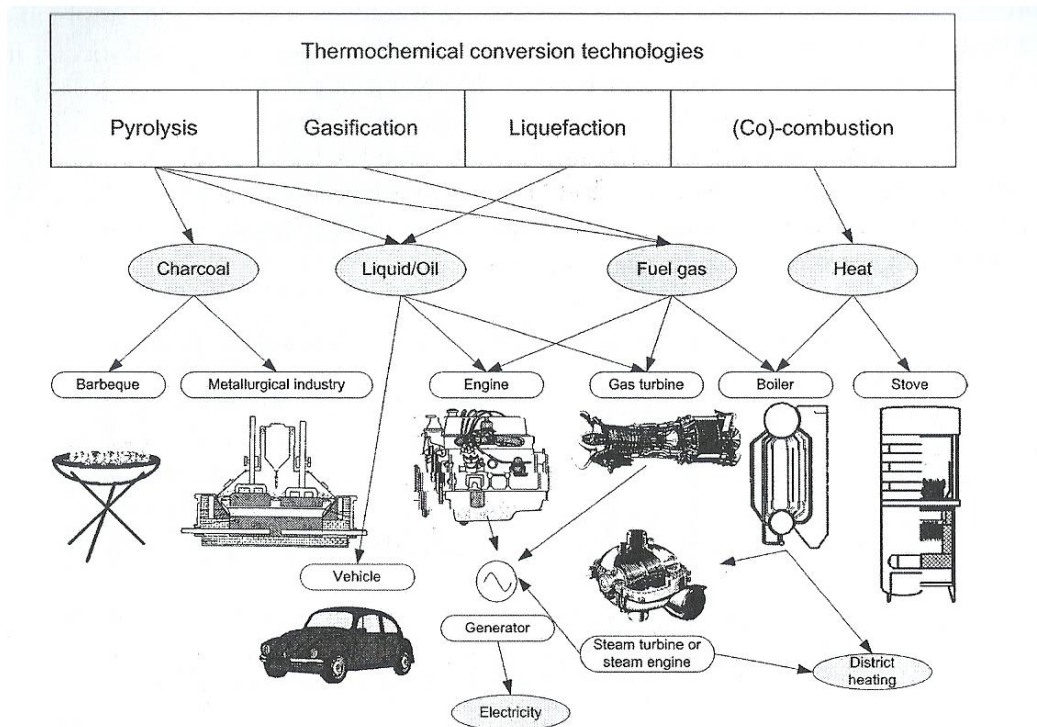


Figura 2. 4- Esquema ilustrativo das conversões termoquímicas quanto às tecnologias, produtos, potencialidades e respetivos usos [9].

### Conversão Bioquímica da biomassa

Os processos bioquímicos são maioritariamente caracterizados pela utilização de enzimas, microrganismos e agentes de origem biológica capazes de converter a biomassa em açúcares e em biocombustíveis gasosos ou líquidos.

#### ✓ Digestão Anaeróbia

Como o próprio nome indica, neste tipo de processo a biomassa é convertida em biogás através da ação de bactérias num ambiente com ausência de oxigénio.

O processo de produção de biogás é dividido em quatro etapas nomeadamente: pré-tratamento, digestão anaeróbia, afinação e valorização de biogás. A produção do biogás é realizada em quatro fases: hidrólise, acidogénese, acetogénese e metanogénese. “O processo de digestão anaeróbia é bastante utilizado a nível mundial devido ao facto de ser muito eficiente no tratamento de resíduos orgânicos e de o produto resultante poder ser integrado em processos de conversão de energia” [1].

A figura 2.5 representa o esquema ilustrativo dos produtos obtidos pelo processo da digestão anaeróbia.

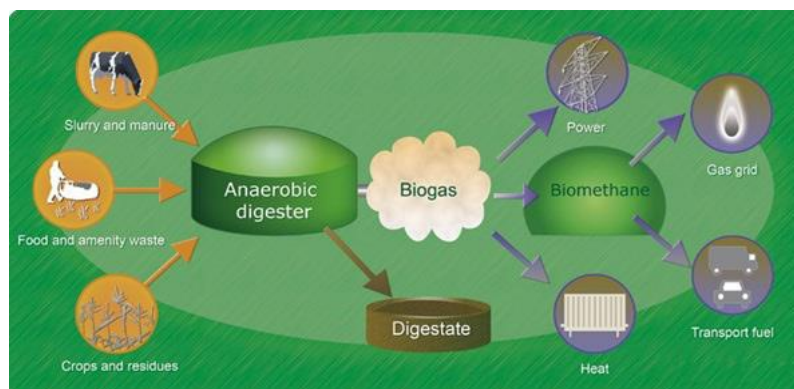


Figura 2. 5- Esquema ilustrativo dos produtos obtidos pelo processo de digestão anaeróbia [8].

#### ✓ Fermentação Alcoólica

O principal objetivo do processo da fermentação alcoólica é a obtenção do bio etanol, num diferente reator, a partir do extrato de açúcar como matéria-prima. A fermentação é realizada num segundo tanque onde é necessário concretizar a moagem da matéria-prima, misturar a água e fermentar. As enzimas que se encontram disponíveis na fermentação vão converter o amido em açúcares e em sucessivas etapas formar-se-á o etanol. Para obter bio etanol puro, este é submetido a um processo de destilação e secagem pode ser utilizado como biocombustível puro ou misturado com outros componentes [1].

#### Conversão Termoquímica

Os processos de conversão termoquímica são caracterizados pelas transformações químicas obtidas a partir das diferentes variações de temperatura.

#### ✓ Pirólise

A pirólise é um tratamento termoquímico onde a decomposição da biomassa ocorre na ausência de oxigénio molecular e ocorre entre temperaturas da ordem dos 350 a 800 °C. Os produtos da pirólise são maioritariamente alcatrão, bio-óleo e gases de baixo peso molecular. Juntamente com estes produtos são formados o CO e CO<sub>2</sub> em quantidades consideráveis a partir de combustíveis ricos em oxigénio e o tipo de combustível, a temperatura, a pressão, o tempo de aquecimento e o tempo de reação são variáveis que afetam a quantidade e as propriedades dos produtos formados [3].

A pirólise pode ser classificada como pirólise rápida, pirólise lenta e ainda pirólise *flash*. Na pirólise rápida a biomassa é aquecida a uma temperatura muito próxima dos 500 °C durante 1 segundo e seguidamente ocorre um arrefecimento rápido para que todo o vapor formado possa condensar durante a combustão e desta forma origina-se o bio-óleo. O bio-óleo apresenta propriedades semelhantes ao petróleo sendo posteriormente submetido a um conjunto de tratamentos de purificação [1].

Os produtos da pirólise podem ser utilizados de variadas formas de acordo com o fim pretendido. O bio-óleo pode ser utilizado para a formação de hidrocarbonetos de alta qualidade para servir como combustível ou pode ser utilizado diretamente para a formação de energia elétrica ou térmica [3].

### ✓ Gasificação

A gasificação pode ser definida como uma degradação térmica na presença de um agente oxidante externo. O termo gasificação é igualmente utilizado para reações de oxidação do carvão juntamente com os elementos como o  $\text{CO}_2$  ou  $\text{H}_2\text{O}$ .

Enquanto a pirólise é otimizada para um valor de produção máximo de carvão ou alcatrão, a gasificação é otimizada para um valor de produção máximo de gás. A gasificação dá-se a altas temperaturas ( $800\text{-}900^\circ\text{C}$ ) e o gás resultante é rico em elementos como:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{CH}_4$ . O agente oxidante nas reações de gasificação pode ser ar, oxigénio, vapor ou  $\text{CO}_2$ . [3]. Existe a formação de um gás rico em  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$  designado por gás de produção que pode ser tratado e posteriormente utilizado em células de combustível.

A figura 2.6 é um esquema ilustrativo do processo termoquímico da gasificação com os tipos de produtos obtidos face às diferentes gamas de temperatura e respetivas finalidades.

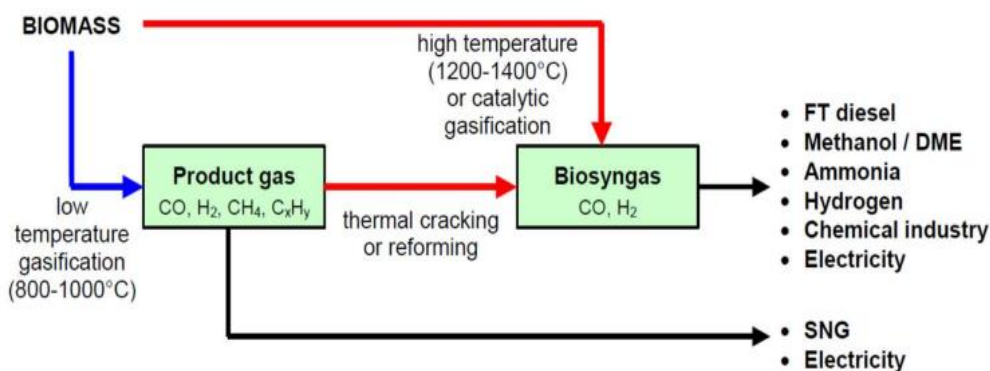


Figura 2. 6- Esquema ilustrativo do processo termoquímico da gasificação para baixas e altas temperaturas [11].

Antes que o combustível possa ser utilizado em turbinas a gás ou em motores de combustão interna, todos os contaminantes (alcatrão, cinzas, carvão e componentes alcalinos) devem ser removidos. [3].

### ✓ Combustão

O processo de combustão pode ser definido como a oxidação completa da biomassa a altas temperaturas ( $800\text{-}1000^\circ\text{C}$ ) utilizando para o efeito vários equipamentos como, fornos, caldeiras, turbinas a vapor ou geradores. A combustão é realizada com excesso de ar e resulta no calor, na formação de vapor de água, cinzas e emissões gasosas. É aplicado a qualquer tipo de biomassa desde que os teores de humidade sejam inferiores a cerca de 50% [8].

#### 2.1.4 O Processo de Combustão da Biomassa

A combustão da biomassa passa por um conjunto de etapas até atingir a composição do carbonizado desejado. Inicialmente esta passa por uma etapa designada de secagem e aquecimento, seguida da volatilização e, finalizando, dá-se a combustão do resíduo carbonoso.

Numa primeira etapa, a secagem e o aquecimento da biomassa leva à alteração das condições físicas na partícula. O processo da combustão é considerado um

processo exotérmico na sua globalidade, contudo apresenta o processo da secagem que é considerado um processo endotérmico.

A energia que é requerida para o processo de secagem e volatilização depende da humidade relativa das partículas, das dimensões e das propriedades físicas como a condutibilidade térmica e a capacidade térmica. A secagem tem lugar assim que a partícula atinge a temperatura de 105 °C e o processo de combustão só se dá se a humidade relativa da biomassa for inferior a 50%.

Após secagem ocorre a volatilização, isto é, a libertação de matéria volátil presente no combustível sólido. Fatores como o tamanho da partícula, a temperatura final e o tempo em que a partícula permanece a essa mesma temperatura influenciam de forma direta a libertação dos compostos voláteis das partículas de combustível sólido [2].

A figura 2.7 representa uma partícula de pequenas dimensões de biomassa nas diferentes etapas da combustão ao longo do tempo.

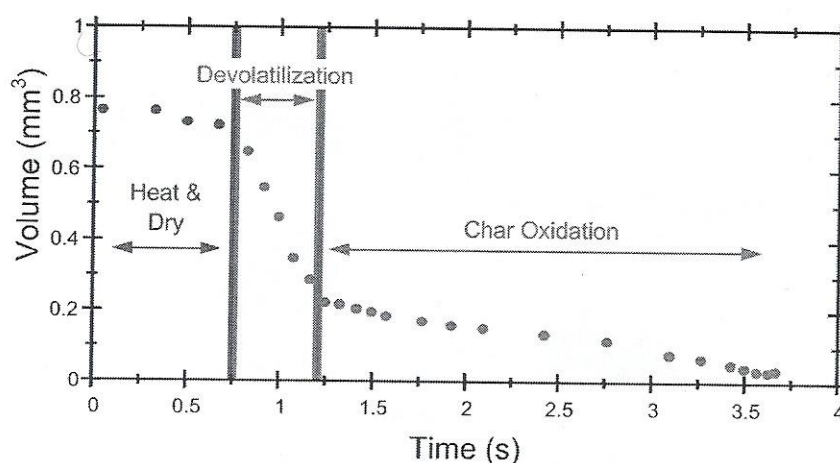
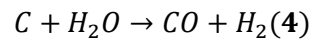
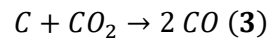
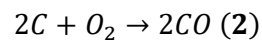
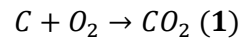


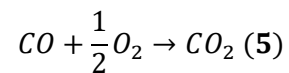
Figura 2. 7- Gráfico representativo de uma partícula de pequenas dimensões de biomassa nas diferentes etapas da combustão ao longo do tempo [9].

Os produtos da volatilização são maioritariamente gases, destacando-se o H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO, hidrocarbonetos leves (CH<sub>4</sub>), H<sub>2</sub> e ainda hidrocarbonetos pesados (alcatrões) como mencionado anteriormente, sendo que o processo ocorre entre o intervalo de temperaturas de 200 °C e os 260°C. Existindo condições necessárias das fases representadas na figura 2.7 então pode-se efetuar a ignição da biomassa. O tipo de reação existente no processo de ignição pode ser homogéneo ou heterogéneo, sendo que esta distinção está relacionada com o facto de se dar a ignição só dos voláteis ou a ignição conjunta dos voláteis e do sólido. Por fim dá-se a última etapa caracterizada pela combustão do resíduo carbonoso resultante do processo de volatilização. O resíduo carbonoso é composto principalmente por carbono e cinzas contendo na sua composição pequenas quantidades de azoto, hidrogénio e oxigénio. O aquecimento da partícula pode levar à sua expansão/dilatação e conseqüentemente ao crescimento do seu grau de porosidade interna.

No decorrer da combustão existem várias reações, sendo a mais importante a reação de oxidação do resíduo carbonoso com o oxigénio. Esta reação é mais lenta que a volatilização e pode ser controlada pela cinética da reação química ou pela difusão do oxigénio nas partículas. As reações do carbono à superfície com o oxigénio, com o dióxido de carbono e com o vapor de água são respetivamente:



O monóxido de carbono é um dos principais produtos resultantes das reações 2 e 3 e, ao reagir com o oxigénio forma dióxido de carbono segundo a seguinte reação:



Em suma, o processo de combustão é o principal processo quando se trabalha com grandes e/ou médias escalas industriais. Os processos de secagem e pirólise/gasificação serão sempre as primeiras etapas da combustão da biomassa sólida.

## 2.2. Geradores de vapor

Os geradores de vapor são equipamentos industriais que convertem a energia obtida a partir da biomassa em energia calorífica. Estes apresentam na sua constituição duas partes com finalidades bem distintas nomeadamente:

- **Câmara de combustão:** Onde ocorre a queima de combustível e a produção dos gases quentes que servirão como fluido de aquecimento.
- **Gerador:** O gerador propriamente dito é o corpo metálico que encerra o fluido que vai ser posteriormente aquecido.

Os tubos dentro da câmara de combustão podem ser de diferentes classificações como por exemplo, tubos de fogo ou tubos de fornalha.

Existem câmaras de combustão de forma retangular ou circular e incorporadas com fornalhas que possibilitem a combustão do combustível e as paredes da fornalha apresentam material refratário e isolante. Quanto ao corpo do gerador, este será o local onde se realiza a transferência de energia térmica dos gases de combustão para o fluido de aquecimento. A resistência mecânica dos materiais utilizados na sua construção, as pressões e temperaturas apresentam enormíssimo peso para o cálculo da transferência de calor [9].

Para além da câmara de combustão e do gerador existem outros equipamentos auxiliares que tem como finalidade melhorar e vigiar o bom funcionamento da caldeira. Como exemplo desses equipamentos tem-se as bombas de alimentação, válvulas de segurança, manómetros, economizadores, pressostato, entre outros. Porém, quando se fala de geradores de vapor (mais concretamente de caldeiras) é necessário ter em conta alguns conceitos [9]:

Superfície de aquecimento de um gerador de calor: Corresponde à superfície metálica que é banhada por um lado pelo fluido quente (constituído pelos gases de combustão) ou por radiação por chama e, pelo outro lado, pelo fluido frio a aquecer.

Timbre de um gerador: O timbre corresponde à pressão máxima a que o gerador pode funcionar sem que esta pressão seja excedida.

Tipos de tubos: Existem dois tipos de conjuntos de tubos, tubos de fumo e tubos de fluido.

- **Tubos de fumo:** No interior passam os gases de combustão e no exterior o fluido a aquecer.
- **Tubos de fluido:** No interior ocorre a circulação do fluido para aquecimento (água ou óleo térmico) enquanto a superfície exterior dos tubos é envolvida total ou parcialmente pelos gases de combustão.

Espelhos, tampos ou chapas tubulares: Nas caldeiras horizontais com corpo cilíndrico, esta designação refere-se às chapas onde se encontram ligados por soldadura os tubos de fumos.

Tambores, barriletes ou coletores: Para as caldeiras aquotubulares, produtoras de vapor ou água sobreaquecida, os tubos encontram-se ligados e a água passa pelo interior dos tubos. Os tambores funcionam como reservatórios que abrigam a água no estado líquido ou gasoso.

Câmara de inversão: Onde ocorre a inversão dos gases quentes que resultam da combustão.

Um gerador de vapor pode ser identificado e especificado por vários aspetos tais como:

- Natureza do fluido a aquecer;
- Timbre e pressão de serviço;
- Temperatura do fluido a aquecer;
- Fonte de combustível;
- Potência térmica a produzir;
- Superfície de aquecimento;
- Capacidade que corresponde ao volume total de todas as partes internas do gerador que se encontram sujeitas à pressão;
- Rendimento térmico.

## 2.2.1 Classificação de Geradores

Para poder classificar os geradores de vapor é necessário ter em conta alguns fatores de grande relevo. Deste modo pode-se classificar os geradores de vapor em diversas categorias como por exemplo em fonte de energia, equipamento da queima, tipo de fluido produzido, as gamas de pressões a que estão sujeitos, entre outras, que serão abordadas com maior detalhe.

### ❖ Fonte de energia

- ✓ Gases de combustão de um combustível: sólido (ex: lenha), líquido (ex: biodiesel) e gasoso (ex: gás propano);
- ✓ Gases de escape quentes (ex: caldeiras de recuperação de barcos, com aproveitamento dos gases de escape dos motores a Diesel);
- ✓ Energia elétrica;
- ✓ Energia nuclear (fissões atómicas);
- ✓ Energia solar

### ❖ Tipo de combustível a ser utilizado

- ✓ Sólidos: carvão (hulha, lenhite, carvão pulverizado), madeira, resíduos industriais (bagaço de azeitona, serradura, resíduos de café).
- ✓ Líquidos: Gasóleo, óleo diesel, thick-fuel-oil, thin-fuel-oil;
- ✓ Gasosos: Gás natural, LPG (gases obtidos pela refinaria do petróleo como o propano e o butano); Monóxido de Carbono

### ❖ Tipo de Fluido Produzido

- ✓ Ar quente
- ✓ Água: Quente (Temperatura até aos 110 °C) e sobreaquecida (temperatura superior a 110 °C)
- ✓ Vapor: Saturado; Sobreaquecido (temperatura superior à de saturação).
- ✓ Óleo térmico mineral com temperatura até 300 °C.

❖ **Número de passagens dos gases de combustão**

- ✓ O número de passagens pode variar de acordo com o número de câmaras de inversão (pode ser 1,2,3 ou 4).

❖ **Tipo de câmara de combustão**

Dentro da câmara de combustão existe a fornalha, os tubos de fogo ou tubos de fornalha e a câmara de combustão tubular (figura 2.8).

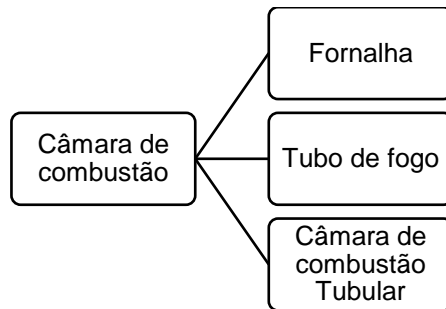


Figura 2. 8-Esquema representativo do que apresenta a câmara de combustão.

❖ **Equipamento de queima**

Nos equipamentos de queima são destacados três tipos de equipamentos essenciais para a queima dos combustíveis. Destacam-se as grelhas fixas, grelhas rotativas e ainda os queimadores sendo divididos entre si de acordo com as suas funcionalidades e características (figura 2.9) [9].

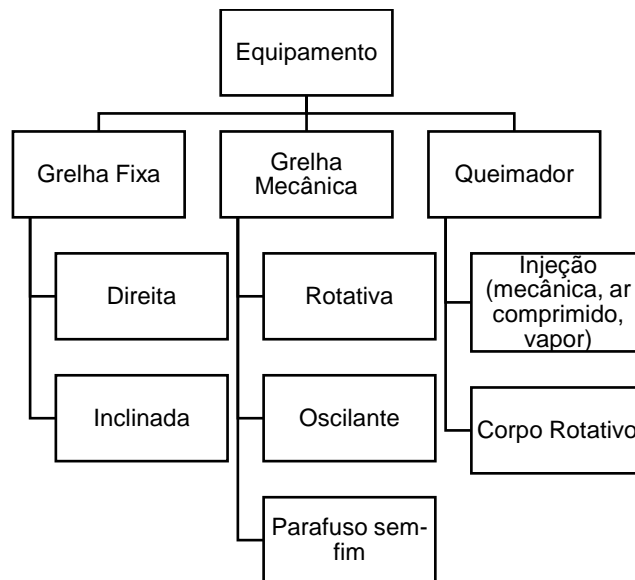


Figura 2. 9-Diagrama representativo dos diferentes tipos de grelhas de acordo com as suas especificações.

### ❖ Posição da câmara de combustão

- ✓ **Exterior:** Caso normal das fornalhas
- ✓ **Interior:** Queimador de combustível líquido ou gasoso

### ❖ Forma, posição e conteúdo dos tubos.

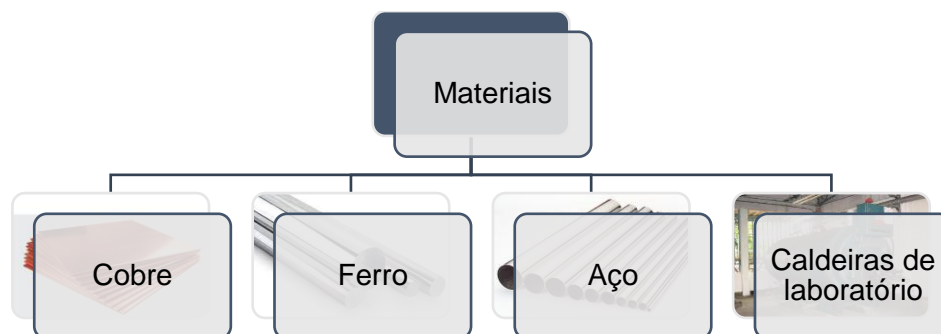
A tabela 2.1 é relativa ao tipo de forma, tipo de posição que os tubos apresentam e qual o tipo de conteúdo dos tubos.

*Tabela 2. 1- Tabela relativa ao tipo de forma, posição dos tubos e conteúdo dos tubos.*

<b>Forma</b>	<b>Posição</b>	<b>Conteúdo</b>
Direitos	Horizontais	Tubos de fumo
Angulares	Inclinados	Tubos de água
Serpentina	Verticais	Tubos de óleo térmico

### ❖ Materiais de construção das caldeiras

A figura 2.10 apresenta o diagrama que divide os tipos de materiais que são normalmente utilizados para a construção das caldeiras.



*Figura 2. 10- Diagrama representativo dos diferentes tipos de materiais de construção para as caldeiras.*

### ❖ Tipo de câmara de inversão

- ✓ Molhada
- ✓ Seca ou *dry back*
- ✓ Parcialmente seca ou *dry back top*

### ✓ Materiais utilizados na câmara de inversão

- ✓ Câmara de inversão em refratário;
- ✓ Câmara de inversão em chapa de aço.

### ❖ Pressão a que estão sujeitas

A pressão de funcionamento influencia o desempenho do gerador de vapor. Existem três gamas de pressões de funcionamento, baixa, média e alta pressão respetivamente representado no diagrama 2.11 [9].

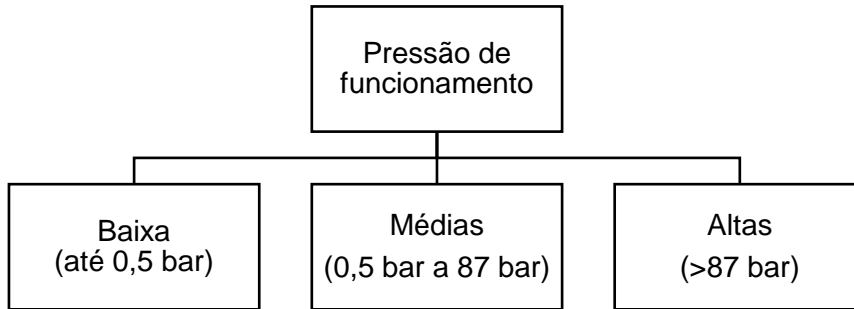


Figura 2. 11-Diagrama representativo das diferentes pressões de funcionamento e a respetiva gama de pressões.

### ❖ Quanto ao tipo de instalação e tipo de isolamento

Quanto ao tipo de instalação é possível caracterizar os geradores de vapor como fixos ou estacionários e como móveis (ex: pode ser utilizado nas locomotivas). Relativamente ao seu isolamento as caldeiras podem apresentar isolantes ou material refratário. A lã de vidro é um exemplo de um isolante frequentemente utilizado nos geradores de vapor.

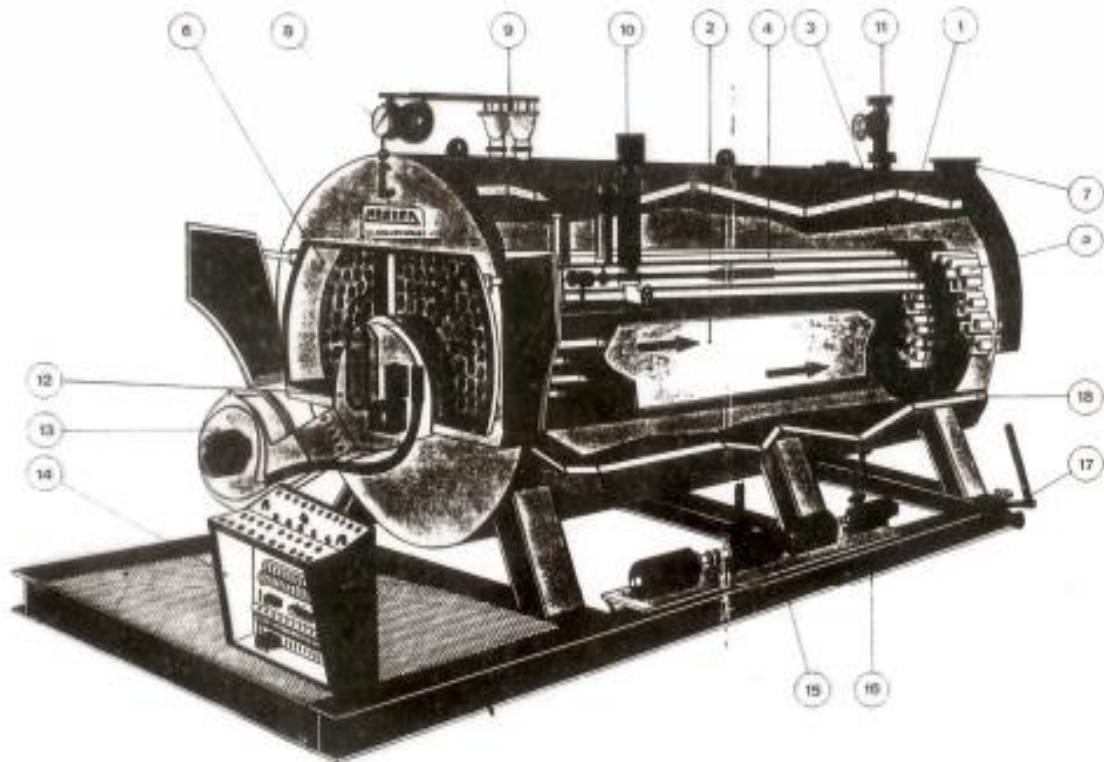
#### 2.2.2 Tipos de geradores de calor

No ponto 2.2.1 foram evidenciados os diferentes aspetos que um gerador de vapor pode apresentar e procedeu-se à sua classificação. Os geradores de calor podem ser divididos em dois grandes grupos segundo o modo de como a água é exposta à ação do calor:

##### Tubos de fumos

Os gases de combustão circulam pelo interior dos tubos enquanto a água ou o vapor circula pelo exterior dos mesmos. Estas caldeiras são normalmente utilizadas industrialmente pelo motivo de serem mais económicas. O depósito de água ou vapor é atravessado por um feixe de tubos, horizontal ou vertical, nos quais passam os gases de combustão.

A figura 2.13 apresenta o aspeto de uma caldeira de tubo de fumos com respetiva legenda de uma caldeira horizontal de tubo de fumos.



*Figura 2. 12- Representação esquemática de uma caldeira horizontal de tubos de fumos e sua respetiva legenda [10]. 1-Corpo do gerador de vapor, 2- fornalha, 3 – Caixa de reversão, 4- Tubos de fumos de 2 passagens, 5 – tubos de fumos de 3 passagens, 6 – Caixa de fumos, 7 – Saída dos gases, 8 – Monómetro, 9 – Válvula de segurança, 10 – Controlador de nível, 11 – válvula geral de vapor, 12 – Queimador, 13- Ventilador, 14- Quadro elétrico de comando, 15 – bomba de alimentação de água (2 grupos eletrobomba ou 1 grupo e 1 injetor manual), 16- Estrado de assentamento, 17- Válvula de purga, 18 – isolamento em lâmina mineral.*

As caldeiras horizontais de tubos de fumos podem ainda ser classificadas de chama direta se os gases de combustão ao saírem da fornalha seguirem irreversivelmente até à chaminé, ou de chama invertida se os gases de combustão circularem em tubos de retorno.

De salientar que as caldeiras de tubos de fumo horizontais de chama invertida são as caldeiras que mais se utilizam na indústria e este tipo de caldeiras são utilizadas habitualmente 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 sobre a forma de vapor ou de água quente [10].

#### Caldeiras de tubos de água ou aquotubulares

As caldeiras aquotubulares podem trabalhar em gamas mais largas de temperatura e pressão e por este motivo o seu custo é mais elevado. Como não apresentam limitações então estas caldeiras são construídas para médias e altas pressões, grandes caudais de vapor e não necessitam de consumir grandes caudais de água comparativamente à quantidade de vapores que produzem as caldeiras de tubos de fumo. Apresentam maior superfície de aquecimento conferindo menores dimensões para o mesmo valor de vaporização e, por este motivo, são utilizadas nas indústrias de maior escala e geralmente são equipadas com economizador, aquecedor de ar e sobreaquecedor.

As caldeiras aquotubulares podem subdividir-se em dois grupos: caldeiras aquotubulares de circulação natural e de circulação forçada. No caso concreto da circulação natural esta depende da diferença de densidades entre a massa de água fria, apresentando um movimento descendente, e uma outra massa de água quente com bolhas de vapor, apresentando um movimento ascendente. A massa de água fria à medida que vai descendo o tubo e ao entrar em contato com a massa de água quente, esta aquece e fica menos densa ascendendo pelos tubos que formam a fornalha sendo que a água mais fria e densa descende e por sua vez condensa. Para a circulação forçada, a circulação da água é realizada com o auxílio de um grupo eletrobomba e para este tipo de caldeira os tubos apresentam menor diâmetro comparativamente com a circulação natural. Como consequência da diminuição do diâmetro ocorre um aumento da velocidade de água a circular e conseqüentemente maiores valores do caudal de vaporização [10].

A figura 2.13 representa o esquema de uma caldeira aquotubular de circulação natural. Estas caldeiras terão sido das primeiras caldeiras a serem fabricadas por *Babcock* com o princípio da circulação natural. Este tipo de caldeira é equipado com um barrilete superior horizontal e apresenta tubos diretos com ligeira inclinação. Os tubos são inseridos em coletores forjados e ondulados onde se pode verificar pelos pontos A e B da figura 2.13. [9].

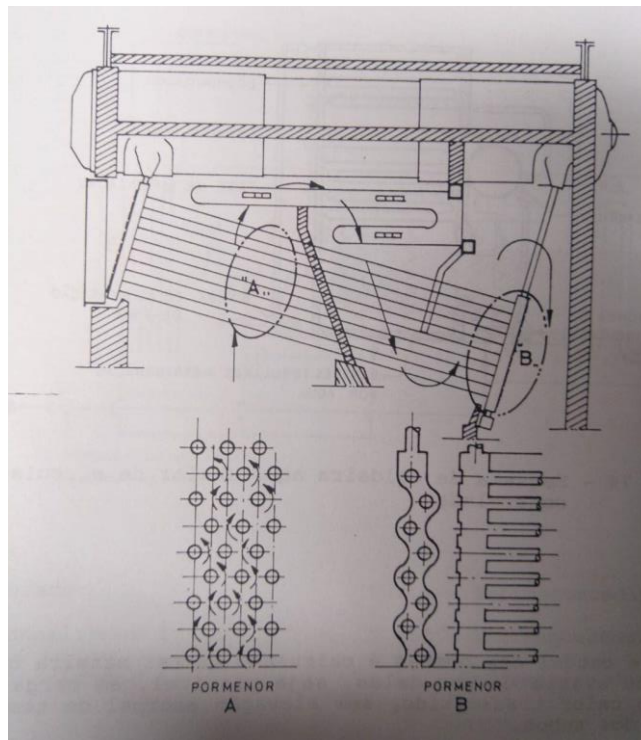


Figura 2. 13- Esquema de uma caldeira aquotubular de circulação natural (tipo Babcock) [9].

À frente de cada extremidade dos tubos existe uma autoclave que permite a inspeção e limpeza interior e permite caso ocorra alguma avaria recorrer à substituição individual dos tubos.

Inicialmente este tipo de caldeira era revestido por material refratário, sendo o barrilete suportado por uma estrutura metálica. A inclusão de um sobreaquecedor entre a parte superior do feixe tubular e do barrilete permite a separação entre o vapor e a água, obtendo-se um vapor relativamente seco.

Para além destas caldeiras, existem também caldeiras aquotubulares de circulação forçada e é possível visualizar um exemplo representado esquematicamente na figura 2.14 com respetiva legenda dos seus constituintes.

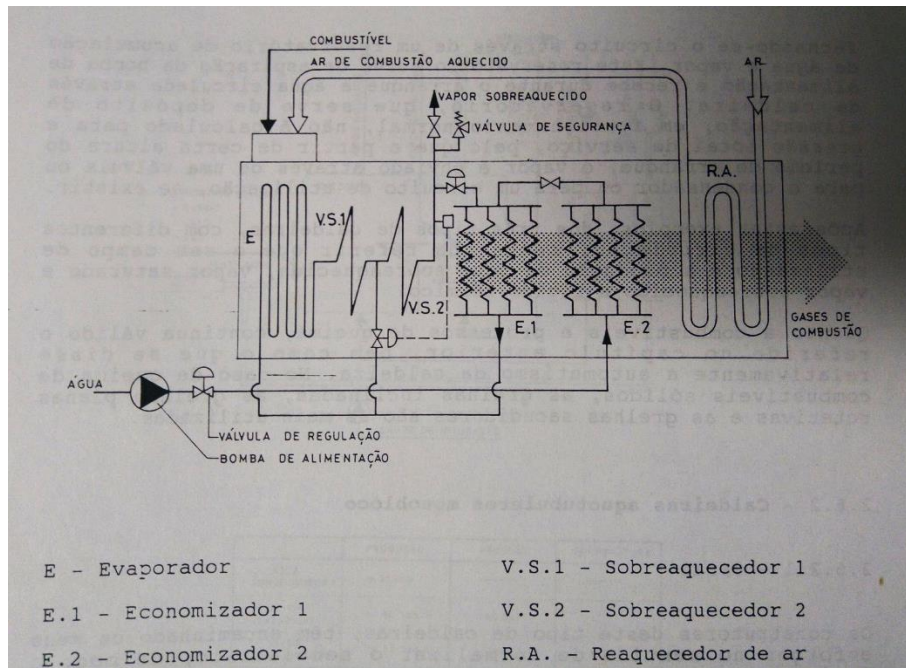


Figura 2. 14- Esquema de um gerador aquotubular de circulação forçada [9].

As caldeiras de circulação forçada, são também designadas de caldeiras de circuito aberto, devido à única passagem que a água efetua desde a entrada que se encontra numa das extremidades do feixe tubular até à saída na outra extremidade mas já sob a forma de vapor. De salientar que neste tipo de caldeira aquotubular de circulação forçada não existe reservatório de acumulação de vapor de água. O campo de utilização das caldeiras aquotubulares de circulação natural e de circulação forçada é para a produção de água sobreaquecida, vapor saturado, vapor sobreaquecido e fluido térmico [9].

## 2.3 Equipamentos e Dispositivos Auxiliares

A casa das caldeiras como o próprio nome indica é um espaço dedicado para caldeiras e respetivos equipamentos que lhe estão subjacentes. Este espaço contudo apresenta regras a respeitar. Assim sendo, a casa das caldeiras, deve conter pelo menos de duas saídas de sentidos opostos com portas de abrir para o seu exterior. Sempre que for possível, uma das saídas deve comunicar com espaços descobertos e deve apresentar na sua construção, materiais de cariz incombustível por motivos de segurança. Quanto à sua construção, a cobertura da casa das caldeiras deve ser fabricada com materiais leves.

Esta deve ter aberturas para espaços livres de modo a diminuir eventuais sobrepressões. A descarga efetuada por válvulas de segurança deve ser realizada igualmente para o exterior para locais inacessíveis ou para depósitos onde não ocorram sobrepressões. De todo modo, na construção da casa das caldeiras deve ser salvaguardado as distâncias legais que se encontram em vigor [10].

A biomassa é colocada num sem fim de alimentação que permite o reencaminhamento da biomassa até ao silo de transporte. No fundo do silo encontra-se um sem-fim que permite transportar o material até a um outro sem-fim de alimentação onde é ligado à caldeira e é realizada a queima do combustível sólido e posteriormente é dada a geração de energia requerida. Os gases de combustão resultantes desta queima são transportados pelo interior dos tubos sendo que o seu destino final é o aquecimento da água. Estes gases de combustão são posteriormente deslocados para um separador de cinzas, onde o multiciclone existente permite separar as partículas designadas de cinzas volantes. Em contrapartida, os gases limpos, são seguidos para uma válvula de borboleta e são direcionados para uma chaminé onde o seu percurso é finalizado com a sua expulsão para a atmosfera.

As caldeiras a biomassa são do tipo tubo de fumos com fornalha integrada no corpo da mesma e é feita para a queima de biomassa, mais propriamente queima de biomassa florestal como o serrim para produção de água quente. A combustão é otimizada de modo a garantir o cumprimento das emissões ambientais que se encontram legisladas. Contudo há certos aspetos a ter em conta na constituição genérica de uma caldeira de tubos de fumos como a existência de certos componentes que melhoram o seu rendimento e a sua performance. Esses elementos são nomeadamente: economizador, pré-aquecedor de ar, sobreaquecedor de ar, exaustor, fornalha, cinzeiro e secção de irradiação e secção de convecção [11].

O **economizador** não é nada mais do que um permutador de calor que através do calor sensível dos gases de combustão que saem da caldeira aquecem a água da alimentação. O **pré-aquecedor de ar** é, tal como o economizador, um permutador de calor que aquece o ar de combustão trocando calor com os gases de exaustão da caldeira. O **sobreaquecedor** aquece o vapor saturado e transforma em vapor sobreaquecido. O **exaustor** realiza a exaustão dos gases de combustão, fornecendo energia para vencer as perdas de carga devido a circulação dos gases. A **fornalha** é um equipamento que contribui para a queima do combustível. Normalmente, a fornalha apresenta uma grelha que facilita a queima. As grelhas podem ser fixas, rotativas ou basculantes dependendo do tipo e da dimensão de material que é amparado. O **cinzeiro** nas caldeiras que funcionam com combustíveis sólidos é o local onde ocorre a deposição de cinzas ou de pequenos fragmentos de combustível que não terão sido queimados anteriormente. A **secção de convecção forçada** é dada por um conjunto

de tubo de feixes de água, onde a água recebe calor por convecção forçada. A **secção de irradiação** corresponde às paredes da câmara de combustão revestidas internamente por água [12].

A quantidade de humidade existente na biomassa pode levar a um menor rendimento da sua produção de energia [13]. Todo o sistema e equipamento requer um processo de manutenção e limpeza periódica.

A figura 2.15 pretende de uma forma muito sucinta mostrar os componentes que fazem parte de um sistema de geração de calor com alimentação da biomassa na casa de caldeiras.

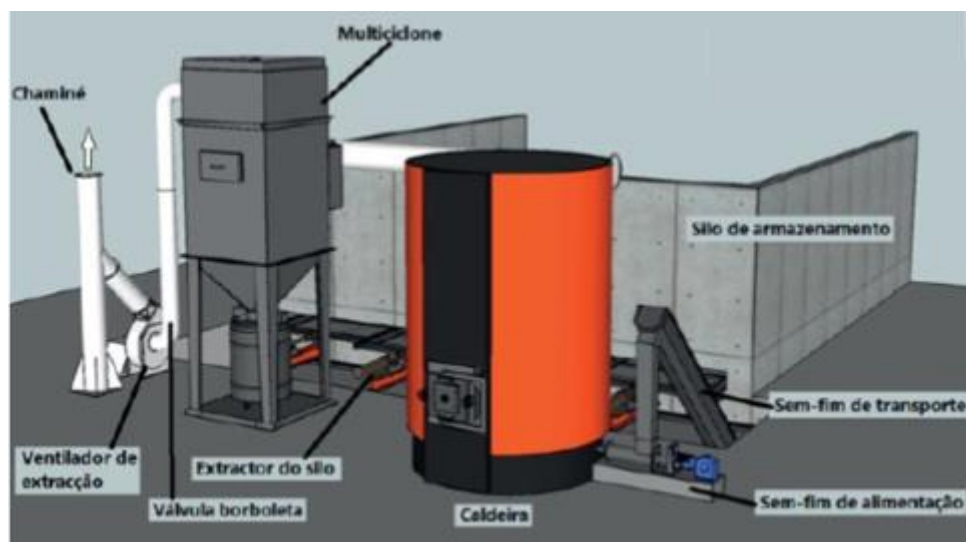


Figura 2. 15- Esquema ilustrativo dos componentes que fazem parte de um sistema de geração de calor com alimentação a biomassa.

Os componentes que fazem parte deste sistema de geração de vapor apresentado na figura 2.15 são:

- Caldeira;
- Chaminé;
- Extrator de silo;
- Separador de cinzas multiciclone;
- Sem fim de alimentação;
- Sem fim de transporte;
- Silo de armazenamento.
- Ventilador de extração
- Válvula borboleta

O extrator de silo trata-se de um equipamento que extrai as aparas de madeira do silo de armazenamento. O silo de armazenamento é o local onde é armazenado e conservado os resíduos da madeira como as aparas. Após a remoção das aparas, a biomassa é transportada por um sem fim de transporte que encaminha até ao sem fim de alimentação. O sem fim de alimentação é encarregue do transporte da biomassa até ao interior da caldeira.

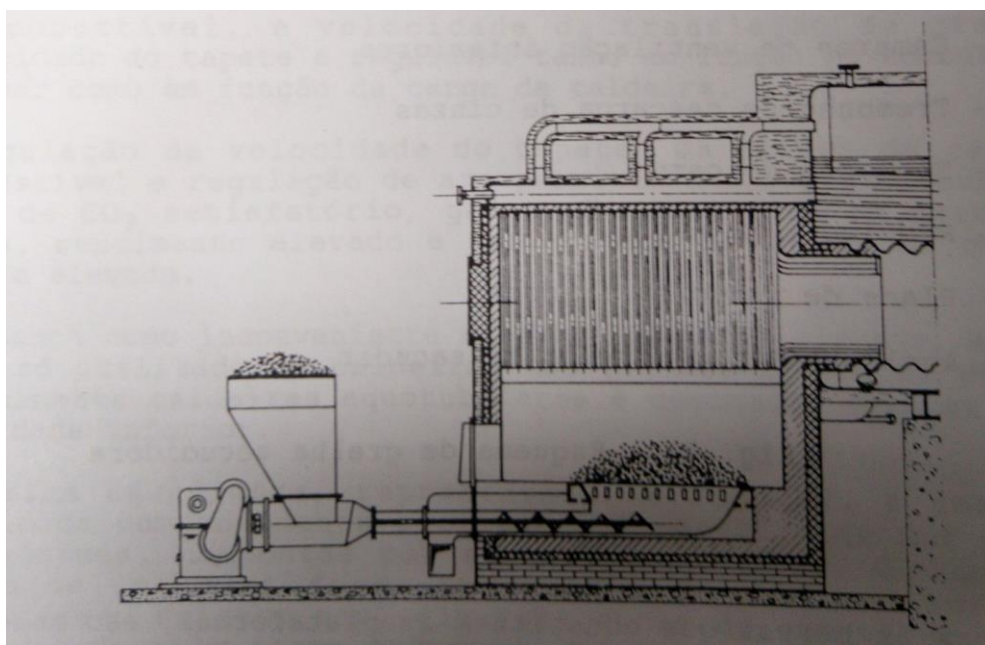
A biomassa ao chegar à entrada da caldeira é transportada por um sem fim do tipo de parafuso até à fornalha. A fornalha é constituída por uma grelha com alimentação

inferior que permite a entrada da biomassa pela parte inferior com alguma quantidade de ar e progressivamente vai aquecendo de modo a que ocorra a libertação de matérias voláteis. Após esta libertação ocorre a combustão total da biomassa produzindo uma quantidade de CO<sub>2</sub> considerável.

No entanto, é preciso evitar a formação de material volátil como as cinzas que após a combustão da biomassa é gerada em grande quantidade e torna-se necessário proceder à sua remoção para impedir acumulações desnecessárias. O separador de cinzas em multiclone faz a recolha destas mesmas cinzas volantes

Por fim, a chaminé, elemento importante na instalação de uma caldeira, permite a dispersão e expulsão das partículas de efluentes gasosos para o meio exterior. A acumulação de efluentes gasosos leva à corrosão e ao desgaste do sistema da casa das caldeiras e se este desgaste acontecer então ocorre a diminuição do rendimento da caldeira.

A figura 2.16 apresenta o exemplo de montagem de grelha plana de alimentação inferior por um parafuso sem-fim em caldeiras de tubos de fumo [9].



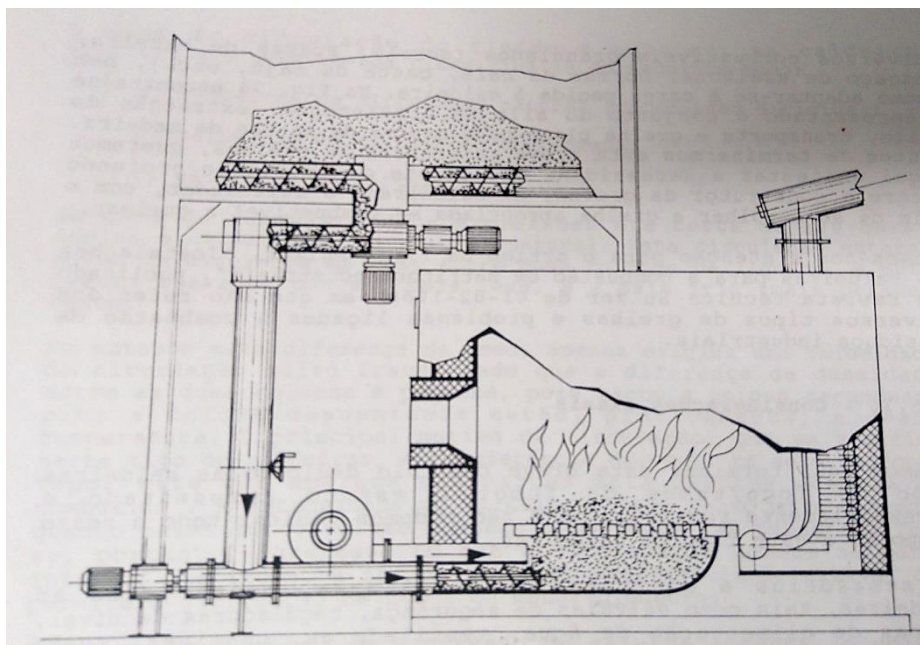
*Figura 2. 16– Exemplo de montagem de uma grelha plana de alimentação inferior por um parafuso sem-fim em caldeiras de tubos de fumo [9].*

O ar utilizado na combustão é insuflado pela utilização de um ventilador e entra lateralmente pelas grelhas que fazem parte da cuba de combustão. As cinzas quando formadas são descarregadas lateralmente para placas laterais, que normalmente apresentam furos, com o objetivo de permitir a entrada de ar de refrigeração e para a combustão dos restantes resíduos que podem se encontrar contidos nas cinzas e o ar secundário é introduzido mais acima da entrada do ar primário assegurando a combustão total da biomassa.

Uma desvantagem deste tipo de grelha passa pelo facto das pellets de madeira entrarem diretamente em contacto com a combustão e com ela criar o risco de voltarem acesas para a tremonha. O movimento, contínuo ou descontínuo, o transportador pode compactar e levar à destruição dos pellets. Para além deste inconveniente existe a possibilidade da combustão não conseguir com que a biomassa se torne tão

homogénea fazendo com que as pellets sejam transportadas na área das cinzas sem que haja queima das mesmas. Neste tipo de alimentação inferior a camada de cinza formada não pode apresentar demasiada espessura uma vez que esta provoca uma combustão deficiente e pode causar o risco de formação de escórias no leito [14].

A figura 2.17 representa o sistema de armazenagem, alimentação e ainda queima do combustível sólido granulado, como o serrim, em grelha plana de alimentação inferior por parafuso sem-fim.



*Figura 2. 17- Sistema de armazenagem, alimentação e queima de combustível sólido granulado em grelha plana de alimentação inferior por parafuso sem-fim [9]*

Nas grelhas com alimentação inferior, parâmetros como a velocidade de acionamento do sem fim de alimentação e do ventilador apresentam algum relevo para a determinação do rendimento da caldeira. Na figura 2.17 é possível observar-se com maior destaque o silo de armazenagem, extração do silo e ainda o transporte e grelha plana para a queima de combustível sólido como as aparas de madeira [9]

O ventilador de extração é necessário para a instalação devido à capacidade de minimizar os riscos de retorno de chama e dos gases de combustão através da tiragem forçada (que será explicado com mais destaque no ponto 2.3.1). É de salientar a importância da válvula do tipo borboleta após o ventilador: a válvula é monitorizada para controlar a depressão da caldeira.

### 2.3.1 Acessórios

O restringimento do fluxo de um determinado fluido para uma única direção leva à criação de válvulas de retenção levando ao surgimento de válvulas de segurança que tem como finalidade não alcançar altos níveis de pressão [15]. Porém, as válvulas também se podem classificar segundo o seu tipo de manuseamento, isto é, se trabalham via manual ou por sistemas de controlo.

A tabela 2.2 apresenta os diferentes tipos de válvulas existentes de acordo com a função, tipo de corte e área de atuação.

Tabela 2. 2 Classificação das válvulas mecânicas de acordo com a função, variável a medir e a sua atuação.

Função	Variável	Atuação
Corte	Caudal	Macho esférico, borboleta, globo, retenção, cunha, adufa
Equilíbrio	Caudal	Equilibradoras
	Pressão	Descarga, pressão diferencial
Segurança	Pressão	Redutoras, segurança
	Caudal	Antipoluição
Controlo	Potência/Caudal	2 vias, 3 vias ou termostático

Na figura 2.18 encontram-se representadas três exemplos de diferentes tipos de válvulas de corte (*da esquerda para a direita: válvulas de macho esférico, de cunha e adufe e de borboleta*). Na figura 2.19 encontram-se representados exemplos dos restantes tipos de válvulas (*fila superior, da esquerda para a direita: retenção, equilibradoras, manutenção de pressão diferencial; fila inferior: válvula segurança e válvula de controlo*).

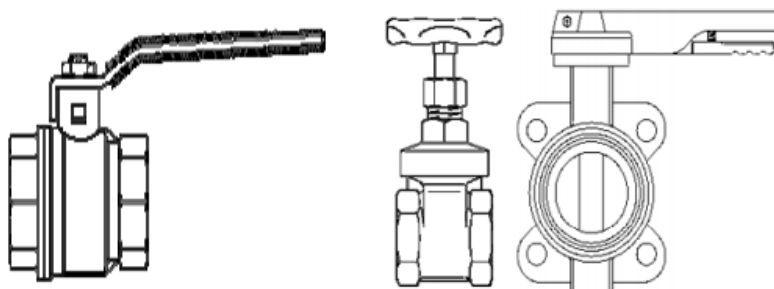


Figura 2. 18 Exemplo de três tipos de válvulas de corte. Válvulas de macho esférico, cunha e borboleta (da esquerda para a direita respetivamente) [15].



Figura 2. 19- Exemplo de válvulas de retenção, equilibradoras, manutenção de pressão diferencial (fila superior) e de segurança e controlo (fila inferior).

- **Bombas**

Como seria expectável os sistemas de controlo de água de alimentação passam pelo abastecimento e pela regulação de água com o intuito de se verificar o nível entre os limites considerados ideais. As caldeiras na sua quase totalidade têm sistemas de controlo automatizados que proporcionam maiores formas segurança, maiores rendimentos e claro, idealmente menores gastos na manutenção [16].

Na figura 2.20 é representado como exemplo uma bomba centrífuga, marca Grundfos e modelo NK 150-315 instalada numa casa de caldeiras.



Figura 2. 20- Imagem representativa de uma das bombas de calor implementadas numa casa de caldeiras. Bomba centrífuga Marca Grundfos e Modelo NK 150-315.

- **Indicador de nível**

A necessidade de utilizar indicadores de níveis é de extrema importância uma vez que estas tem o objetivo de indicar o nível de água que se encontra disponível dentro do tubulão de evaporação. Normalmente este tipo de indicadores são constituídos por um vidro tubular. A figura 2.21 é um exemplo de um indicador de nível.



Figura 2. 21- Exemplo de um indicador de nível utilizado para um gerador de vapor [19].

- **Injetores**

No caso de ocorrerem falhas de energia elétrica, existem dispositivos que permitem auxiliar as caldeiras nessas mesmas situações garantindo assim a alimentação normal das caldeiras. O vapor proveniente da caldeira é expandido a altas velocidades e a baixas pressões. A água é succionada e quando entra em contato com o vapor a altas temperaturas, esta é reencaminhada para um difusor a altas velocidades e com um aumento da pressão existe o ingresso da água na caldeira [16]. A figura 2.22 é uma representação esquemática do funcionamento de um injetor.

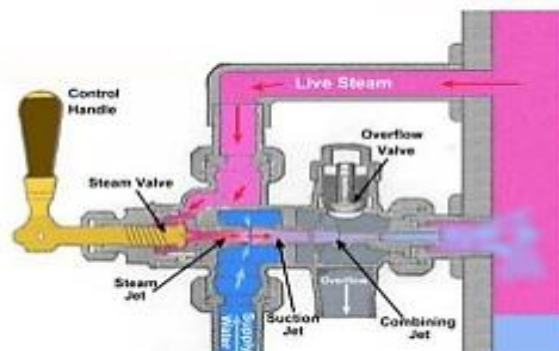


Figura 2. 22- Representação esquemática do funcionamento de um injetor implementado numa caldeira.

- **Pressostatos e manômetros**

Os pressostatos atuam em conjunto com queimadores e com alimentadores de combustível. Tal como o nome indica, os pressostatos mantêm a pressão dentro de uma gama de operação admissível. Quanto aos manômetros, a sua utilização é imprescindível. Os manômetros nas caldeiras devem ser conectados diretamente ao espaço ocupado pelo vapor e estes devem ser graduados apropriadamente. A caldeira deverá dispor de uma ligação para um manómetro aferidor [16].

- **Ventiladores**

Os ventiladores são máquinas de fluxo motoras que transferem energia a gases através da ação de um rotor [17].

O seu princípio de operação é semelhante ao das bombas centrífugas: tratam-se de máquina de fluxos motoras que são capazes de transferir a energia a gases e líquidos através da ação de um rotor. Através da diferença de pressões de dois meios distintos é possível conduzir os fluídos. Esta movimentação pode ser feita entre dois meios ambientes, reservatórios, equipamentos e dispositivos.

A natureza de cada fluido e as funções das respetivas máquinas fazem com que alguns processos e fenómenos sejam específicos [18].

No capítulo 3 será abordado com maior pormenor o tema dos ventiladores visto que o objetivo principal da presente tese passa pela seleção do sistema de ventiladores para uma caldeira a biomassa.

- **Outros dispositivos**

O sensor de chama que se encontra no queimador, é um dispositivo importantíssimo pois permite avaliar as condições operatórias da chama. A válvula de purga (também conhecida como válvula de descarga) encontra-se sempre instalada no ponto cota mais baixa da caldeira. Existem ainda as válvulas de bloqueio que se encontram instaladas na saída de vapor das caldeiras que permitem o não retorno de qualquer tipo de fluido [16].



## Capítulo 3 – Ventiladores – Seleção do sistema de ventiladores para uma caldeira a biomassa

### 3.1 Classificação de Ventiladores

Os ventiladores são equipamentos utilizados para movimentar os gases, transformando energia mecânica do rotor em energia cinética do fluido que neste caso em concreto é o ar [19]. Os ventiladores podem ser classificados quanto à forma do rotor e podem dividir-se em ventiladores radiais (ou centrífugos) e axiais [18].

A tabela 3.1 representa as diferentes classificações e respetivas especificações dos diferentes tipos de ventiladores [17].

*Tabela 3. 1* Classificações e respetivas especificações dos diferentes tipos de ventiladores de acordo com o número de estágios existentes [17].

<b>Tipo</b>	<b>Classificação</b>	<b>Número de estágios</b>	<b>Caraterísticas</b>
<b>Radial</b>	Ventilador centrífugo	1	baixa pressão: até 150 mmH <sub>2</sub> O média pressão: até 250 mmH <sub>2</sub> O alta pressão: Até 250 ~ 750 mmH <sub>2</sub> O
		>1	100 mH <sub>2</sub> O até 12 rotores
<b>Axial</b>	Ventilador Axial	1	Hélice simples para a movimentação de ar ambiente, ventilador de teto, ventilador de coluna.
		>1	30mH <sub>2</sub> O

O tipo de ventilador mais utilizado é o centrífugo de pás ou de aletas curvadas para trás, caracterizado por ser o mais eficiente dos dois tipos ventiladores pois a velocidade do escoamento é menor e o canal formado pelas aletas tem a forma apropriada para o escoamento do gás através do rotor. O seu uso é mais indicado para sistemas de condicionamento de ar [18].

### 3.1.1 Ventiladores Axiais

Os ventiladores axiais são caracterizados por deslocar o ar paralelamente ao eixo por impulsão. São os mais indicados para gerar grandes caudais de ar com pequena pressão.

A figura 3.1 apresenta o aspeto de um ventilador do tipo radial.



*Figura 3. 1- Exemplo de um ventilador do tipo axial [18]*

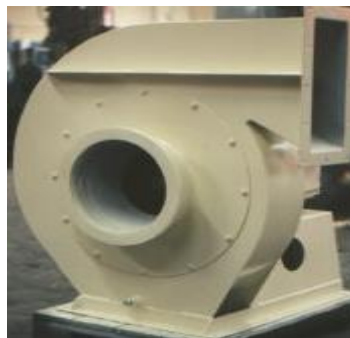
As curvas características dos ventiladores axiais geralmente apresentam instabilidades ao longo da curva. No ponto 3.3 é abordado com mais pormenor as curvas características dos ventiladores.

### 3.1.2 Ventiladores Centrífugos

Os ventiladores radiais ou centrífugos, como já foi dito anteriormente, são os mais eficientes entre os dois tipos ventiladores devido à baixa velocidade de escoamento do fluido e não apresentam irregularidades nas curvas características.

Os ventiladores em estudo são do tipo centrífugo e são de ataque direto. O termo, ataque direto, significa que é adicionado diretamente o caudal de ar para dentro da caldeira e que a rotação do motor corresponde à rotação da turbina.

A figura 3.2 apresenta um exemplo do aspeto de um ventilador centrífugo.



*Figura 3. 2- Exemplo de um ventilador centrífugo [18].*

## 3.2 Tiragem

Após a combustão da biomassa, os gases quentes realizam um conjunto de percursos que levam ao aproveitamento do calor gerado. Posteriormente ocorre a expulsão dos gases para a atmosfera através da chaminé. Para que exista este movimento dos gases é necessário que exista diferenças de pressões que promovam a retirada dos gases queimados e que permite a entrada de uma nova quantidade de ar e de combustível.

A este fenómeno onde se cria pressões diferenciais na fornalha dá-se o nome de tiragem. Assim sendo, a tiragem é caracterizada pelo fluxo de gases ou de ar que através da chaminé do gerador de vapor, conduta ou equipamento, é capaz de provocar corrente de ar por diferenças de pressão ou densidade [17].

A tiragem pode ser tiragem natural, quando é realizada por meio da chaminé, e de tiragem forçada para produzir depressão. Neste último tipo de tiragem são utilizados equipamentos próprios designados por ventiladores [19].

### 3.2.1 Tiragem Natural

A remoção dos gases e o suprimento do ar é feito através da aspiração da chaminé. A fornalha, enquanto ocorre a combustão, geralmente atua em depressão e a sua aplicação é realizada em caldeiras com pequenas perdas de carga [19].

O ar é permutado devido à diferença de pressão entre a fornalha e a parte superior da chaminé que é suficiente para garantir o suprimento do ar e a remoção dos gases de exaustão.

A figura 3.3 representa esquematicamente a tiragem natural onde normalmente esse tipo de tiragem é realizada em caldeiras mais antiquadas com pequena capacidade e pouca superfície convectiva. A principal desvantagem deste tipo de tiragem é que encontram-se condicionadas pelas condições climáticas e pela pressão atmosférica [19].

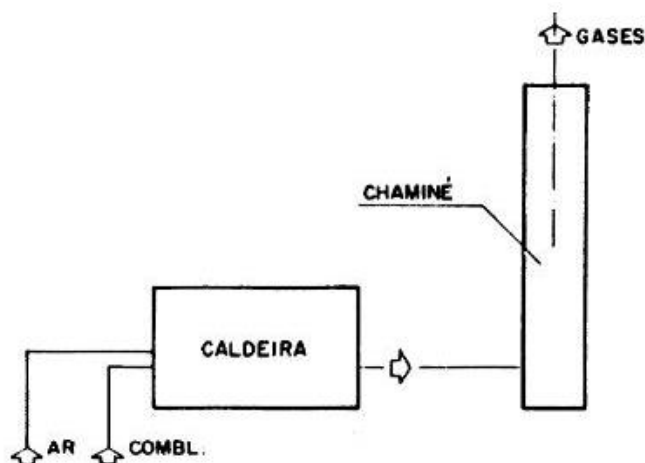


Figura 3. 3 Representação esquemática da tiragem natural [19].

O deslocamento dos gases quentes de combustão é feito através da convecção natural. Esta é obtida pela ação natural da chaminé que recebe os gases quentes da fornalha e o seu interior facilita-lhes a subida originando a rarefação à entrada do cinzeiro onde o ar se encontra frio, obrigando-o a entrar na fornalha através da grelha.

### 3.2.2 Tiragem Forçada

Nas caldeiras tanto de tubos de fumos como nas aquotubulares é necessário existir ar para ocorrer combustão do combustível. Desta forma é necessário existirem ventiladores que possam introduzir ar para a combustão e ainda movimentar os gases de combustão até à chaminé. Os ventiladores mais utilizados são os ventiladores centrífugos: o ar entra paralelamente ao eixo de fixação e rotação da turbina, ou seja, este entra axialmente e sai radialmente mal tenha sofrido um aumento da pressão e da velocidade. A pressão total do ar ventilado resulta de dois componentes: a pressão dinâmica, responsável pela velocidade do ar na sua passagem através do ventilador e da pressão estática das perdas de carga verificadas na travessia da caldeira e dos respetivos equipamentos agregados [9].

A figura 3.4 exemplifica a instalação de uma caldeira com tiragem forçada onde é possível verificar a entrada do ar, do combustível e da água desde que o ar entra na caldeira até ao momento em que há expulsão dos gases de combustão pela chaminé.

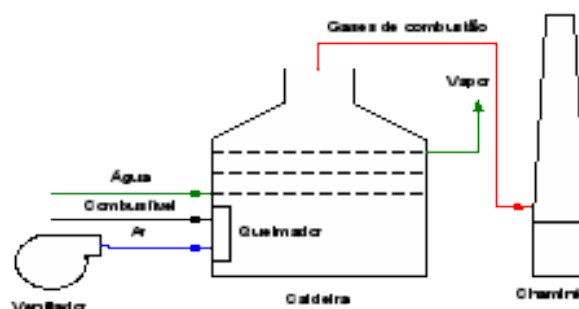


Figura 3. 4 -Exemplo de esquema ilustrativo de uma caldeira com ventilador de tiragem forçada.

A fornalha opera a uma pressão positiva e é o tipo de tiragem mais utilizado em caldeiras de tubos de fumos. A principal desvantagem da tiragem forçada é o vazamento de gases de combustão para o exterior causando problemas aos operadores e equipamentos [19].

Os ventiladores utilizados para a presente tese correspondem a ventiladores de tiragem forçada pois possuem a capacidade de acompanhar o ar atmosférico e os gases de combustão para os queimadores através das tubagens das caldeiras.

A figura 3.5 representa o exemplo do ventilador de tiragem forçada utilizado na caldeira de tubo de fumos.



Figura 3. 5- Exemplo de um ventilador de tiragem forçada utilizado numa casa das caldeiras.

No entanto, existem mais tipos de tiragem forçada como por exemplo, ventiladores de tiragem forçada por jatos de vapor, por ar comprimido, entre outros.

### 3.2.3 Tiragem Induzida

A tiragem induzida apresenta um exaustor na saída da caldeira o que cria uma pressão ligeiramente negativa no interior da fornalha. Os produtos da combustão são succionados e vão de encontro à chaminé. O ar de combustão é alimentado pela pressão negativa existente.

A figura 3.6 representa esquematicamente a tiragem induzida onde se verifica a existência de um ventilador à saída da caldeira e conseqüentemente a entrada da chaminé [19].

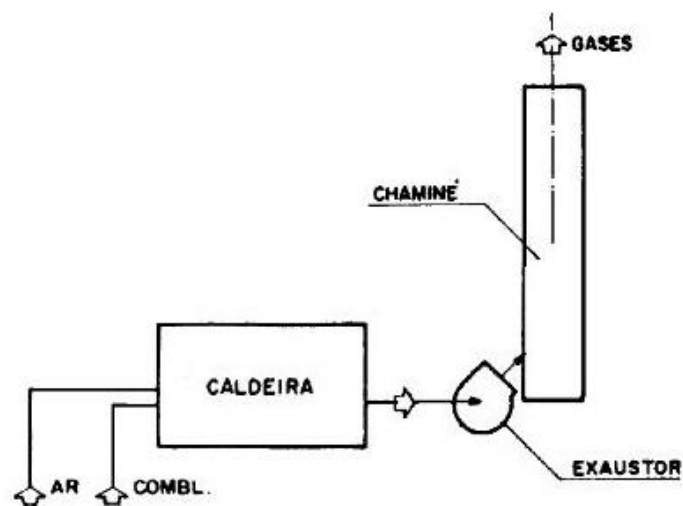


Figura 3. 6- Representação esquemática da tiragem induzida [19].

### 3.2.4 Tiragem Balanceada

A tiragem balanceada é uma combinação da tiragem forçada com a tiragem induzida. O ventilador de tiragem induzida apresenta, normalmente, maior capacidade que o ventilador de tiragem forçada devido ao volume de gases de exaustão ser maior que o volume do ar.

O aprimoramento dos dispositivos de combustão e queimadores, no que se refere a eficiência e estabilidade de chama obrigou o uso de ventiladores de insuflamento de ar face a necessidade de pressão nos dispositivos de entrada do ar de combustão a fim de provocar turbulência na câmara de combustão.

A figura 3.7 representa a tiragem balanceada onde se utiliza um ventilador de insuflamento de ar na fornalha e um exaustor dos produtos de combustão na saída da caldeira.

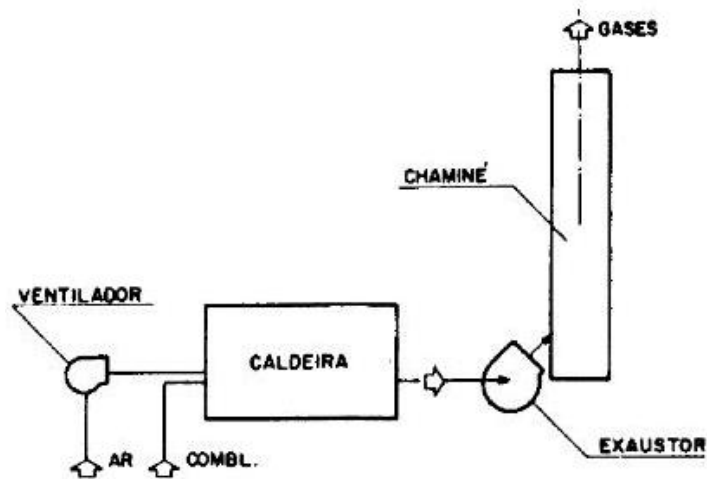


Figura 3. 7- Representação esquemática da tiragem balanceada [19].

A pressão dentro da fornalha e na zona de convecção é possível de ser controlada, de forma a manter-se negativa em relação a atmosfera e deste modo continuar a ter a pressão disponível aos equipamentos de mistura e disponível à combustão dos queimadores [19].

### 3.3 Sistemas de Ventilação – Ar Primário, Secundário e Terciário

Para que ocorra a reação de combustão da biomassa é necessário a adição de uma determinada quantidade de ar que se encontra em excesso. Assim sendo, uma caldeira alimentada a biomassa pode apresentar na sua instalação ventiladores de ar primário, secundário e ainda terciário, que sejam eficazes na combustão da biomassa.

De acordo com cada instalação pode acontecer que determinadas caldeiras apresentem mais que um ventilador de ar primário ou secundário. Mas porquê a necessidade de se implementar mais que um ventilador? No caso do ventilador de ar primário, este é misturado com o combustível e pretende-se que ocorra idealmente, a combustão total pois o ar primário reage principalmente com o carbono presente da biomassa. O ar primário é provido sob a grelha e é forçada a entrar por esta para que a biomassa possa secar, desvolatilizar e queimar os seus resíduos. A quantidade de ar primário é geralmente ajustada para minimizar o excesso de ar utilizado na combustão da biomassa [20].

O ar secundário é injetado mais acima da grelha e é utilizada para fornecer uma mistura turbulenta e quebrar em partículas mais pequenas os hidrocarbonetos que evoluíram a partir do leito de resíduos.

Os ventiladores terciários são facilmente encontrados nas caldeiras pois a quantidade de ar secundária pode não ser o suficiente para o processo de combustão e assim adiciona-se uma terceira quantidade de ar. Para além de auxiliar na combustão insuficiente da biomassa, o ventilador de ar terciário tem como função baixar a temperatura da reação de combustão e minimiza o arraste de material particulado junto com os gases de saída que são expulsos pela chaminé. A queima de combustíveis sólidos geralmente ocorre a altas temperaturas e é por este motivo que é necessário baixar a temperatura de combustão [21]

O ar terciário é injetado ainda mais acima do leito, isto é, acima do ar secundário, com caudais e velocidades superiores para originar a mistura completa dos gases de combustão, conseguindo atingir níveis baixos de monóxido de carbono nos gases de saída [20].

A adição do ar primário, secundário e terciário proporciona um ambiente oxidante para as reações de oxidação do biocombustível [21].

O ventilador de ar primário é colocado junto à localização do sem-fim de entrada a uma determinada altura do solo. O sem-fim de alimentação permite a entrada do biocombustível e como o ar primário é misturado com a biomassa, o sem fim e o ventilador de ar primário precisam de estar próximos um do outro.

O ventilador secundário é colocado a uma altura semelhante à do primário mas é localizado num lado oposto junto à câmara de combustão.

O ventilador de ar terciário é o que se situa mais próximo do solo no entanto o ar terciário é o que se situa mais longe do leito, ficando imediatamente acima do ar secundário. Este ar permite a circulação de partículas residuais conseguindo arrasta-las junto com o ar para serem expulsas pela chaminé. Quanto à localização dos ventiladores de ar primário, secundário e terciário varia de acordo com o tipo de caldeira utilizada. Para o caso de uma caldeira vertical, de tubo de fumos, a localização dos ventiladores é feita de acordo com a figura 3.8.

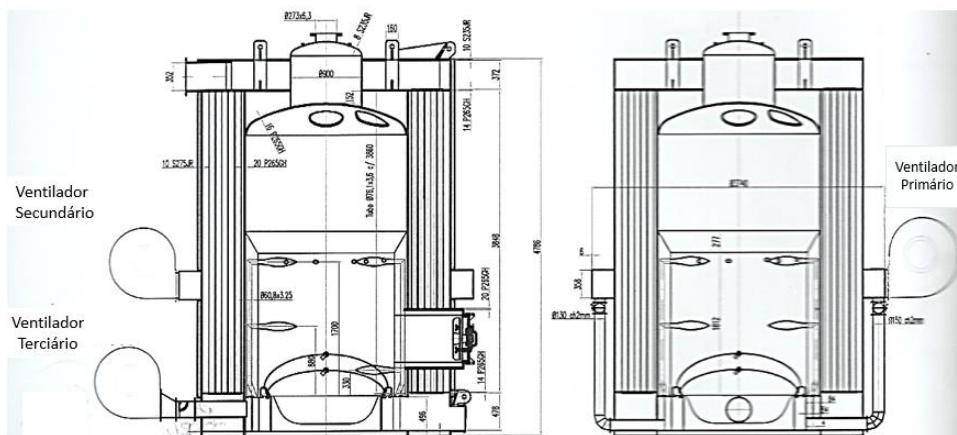


Figura 3. 8- Localização do ventilador de ar primário, ar secundário e ar terciário generalizada num ventilador vertical de tubo de fumos em Auto Cad.

As caldeiras normalmente não apresentam mais que um sistema de ventilação de ar primário, secundário e terciário. Os ventiladores são de tiragem forçada e três ventiladores são o suficiente para que ocorra a combustão completa do biocombustível.

### 3.4 Curvas Caraterísticas dos Ventiladores

Os ventiladores apresentam curvas caraterísticas que definem a cada rotação, valores de uma certa variável em função da quantidade de ar numa base volumétrica para um dado ventilador. O conhecimento das curvas caraterísticas é essencial para a seleção sistemas de ventilação.

As curvas também permitem selecionar qual o ventilador que apresenta as condições ótimas de trabalho [18].

Existem três tipos de curvas que podem ser determinadas através dos seguintes parâmetros de dimensionamento [18].

A pressão total,  $P_t$ , corresponde à quantidade de energia específica que o ventilador transfere ao fluido de trabalho sob certas condições de referência. A pressão total, é a soma da pressão manométrica na saída do ventilador com a pressão dinâmica também na seção de descarga do ventilador, expressa em comprimento de coluna de água (milímetro ou metro,  $\text{mmH}_2\text{O}$  ou  $\text{mH}_2\text{O}$ ) [18]:

- Caudal de ar e pressão total,  $Q_{ar} \times P_t$
- Caudal de ar e potência mecânica,  $Q_{ar} \times P_{mec}$
- Caudal de ar e eficiência mecânica,  $Q_{ar} \times \eta_{mec}$

Geralmente a curva caraterística,  $Q_{ar} \times P_t$ , é a mais utilizada e é possível visualizar para os diferentes tipos de ventiladores a curva caraterística de acordo com estes dois parâmetros na figura 3.9.

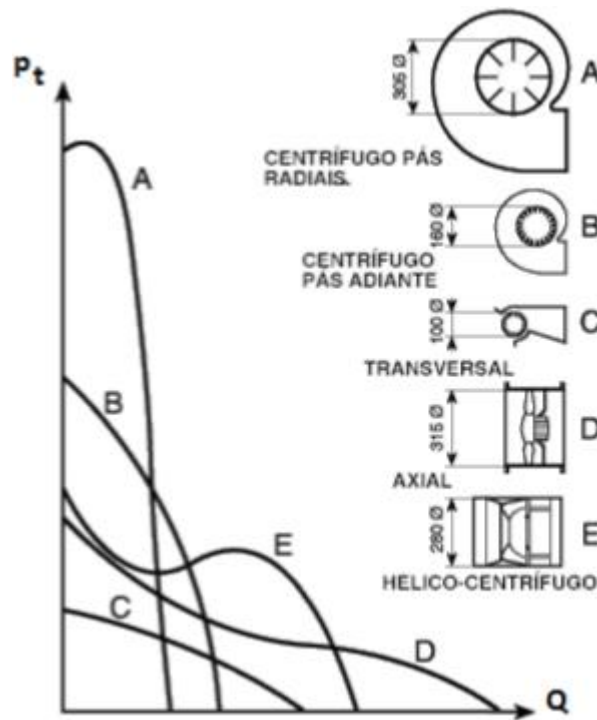


Figura 3. 9- Curva caraterística,  $Q_{ar}$  x  $P_t$ , para os diferentes tipos de ventiladores [18]

A figura 3.10 apresenta a curva caraterística da pressão total e do caudal de ar quando o ventilador opera em rotação constante.

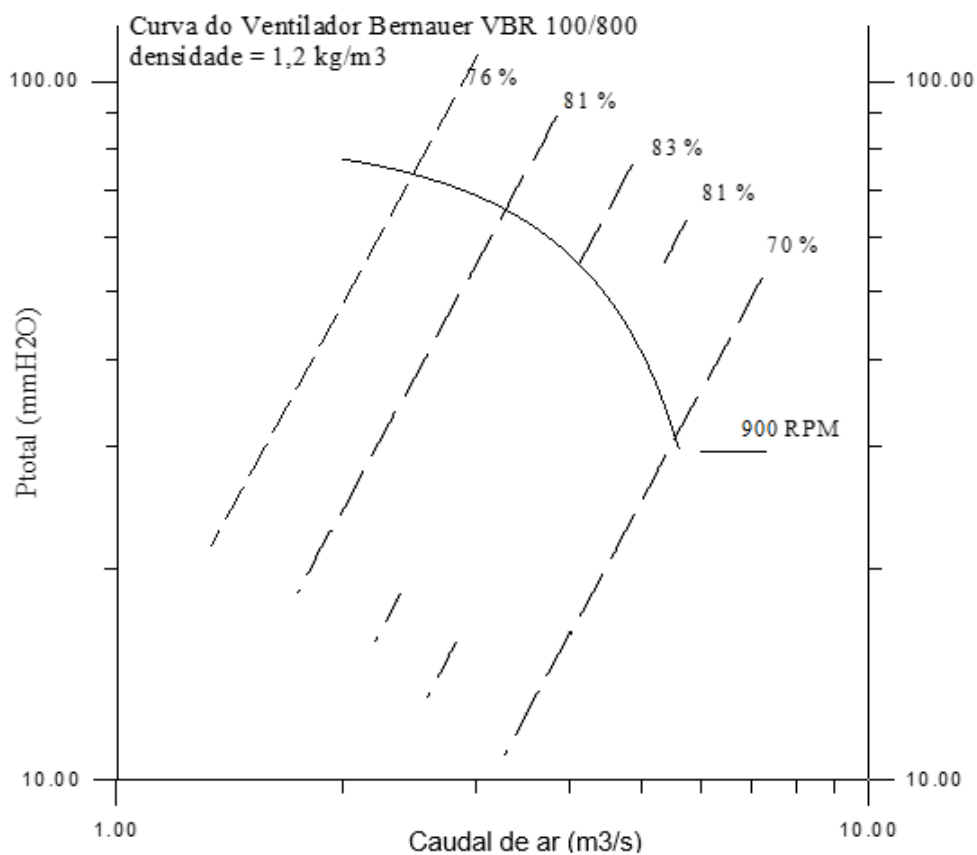


Figura 3. 10- Curva caraterística,  $P_{total}$  x  $Q_{ar}$ , de um ventilador que opera em rotação constante [18].

A forma das curvas características dos ventiladores está associada à forma do rotor destes equipamentos. E, o que é importante, a instalação e a operação de um certo ventilador em um sistema de ventilação, depende da forma de sua curva característica que em outras palavras, depende da forma de seu rotor. Apesar de normalmente ser utilizado este tipo de curva característica, é usual que um ventilador apresente em um gráfico todas as curvas características juntas, inclusive a do rendimento para que a escolha do modelo possa ser o mais eficiente possível.

### 3.5 Determinação do caudal de ar e das perdas de carga

#### 3.5.1 Reações de oxidação

Primeiramente são realizados cálculos a nível da combustão da biomassa no interior da fornalha, ou seja onde são realizados balanços mássicos importantes para a determinação da quantidade específica de ar (utilizado nos ventiladores presentes na caldeira) e para a determinação da quantidade de gases formados no momento da combustão da biomassa e ainda para a determinação da composição dos gases produzidos nas diversas reações de combustão da biomassa.

Conhecendo a composição ponderal de um dado combustível é possível determinar os produtos finais de uma combustão completa assim como a energia térmica que é libertada. O calor libertado na combustão completa assumindo um quilograma ou um metro cúbico de combustível designa-se por poder calorífico (kJ/kg ou kJ/m<sup>3</sup>). Deste modo é possível determinar através da equação (6) de *Dulong* e *Petit* [9] que corresponde à determinação do poder calorífico inferior, a densidade energética do combustível:

$$PCI = 32790C + 119790 \left( H_2 + \frac{O_2}{8} \right) + 925S - 2512E \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (6)$$

Os elementos C, H, O e S, na equação 8, correspondem à fração mássica de cada um destes elementos no combustível e o E corresponde à quantidade percentual de água existente no combustível [9]. Como existe a formação de água nos produtos de combustão então pode-se definir que para o combustível ou biomassa em causa existem dois poderes caloríficos: superior e inferior. A água, como produto de combustão, pode ser condensada ou pode permanecer na forma de vapor. O vapor de água que é produzido na reação de combustão nos geradores de vapor é expulso pela chaminé. O PCS representa o calor libertado pela combustão em que a água se apresenta na sua forma líquida e o PCI representa o calor libertado pela combustão estando a água na sua fase gasosa.

A utilização do ar atmosférico é um fator a ter em conta na determinação do oxigénio necessário para a reação da combustão completa. O ar atmosférico é constituído essencialmente por oxigénio (O<sub>2</sub>) e azoto (N<sub>2</sub>) e outros gases, inertes.

A composição ponderal e em volume do O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> do ar é respetivamente:

Base Ponderal: 23,21 % de O<sub>2</sub> e 76,79% de N<sub>2</sub>

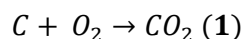
Base Volumétrica (condições PTN, P = 0 atm e T = 273 K): 21% de O<sub>2</sub> e 79% de N<sub>2</sub>

Procede-se desta forma ao cálculo elementar da combustão de um determinado biocombustível.

### **Combustão**

De acordo com os valores percentuais obtidos a partir da análise elementar do combustível sólido na caracterização da biomassa é possível obter uma relação entre os constituintes existentes na biomassa com os produtos formados a partir de reações químicas.

#### **Reação do Carbono**



Uma molécula de O<sub>2</sub> é necessária para reagir com uma molécula de C de modo a dar origem a uma molécula de CO<sub>2</sub> e libertar uma determinada quantidade de energia sob a forma de calor. A tabela 3.2 apresenta as quantidades em jogo de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> e de N<sub>2</sub> por cada kg de carbono que reage com ar atmosférico [9].

*Tabela 3. 2- Quantidade mássica (kg) do carbono e do oxigénio dando dióxido de carbono como gás de formação da reação de combustão.*

<b>Quantidade Mássica (kg)</b>			
<b>Carbono (C)</b>	<b>Oxigénio (O<sub>2</sub>)</b>	<b>Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	<b>Azoto (N<sub>2</sub>)</b>
1,00 kg	2,66 kg	3,66 kg	8,81 kg

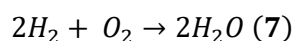
A quantidade de ar teórica necessária à combustão de 1 kg de C será a soma da quantidade de oxigénio e de azoto que corresponde a 11,478 kg. A massa dos produtos resultantes da combustão sem ter qualquer excesso de ar associado é dada pela soma do dióxido de carbono e de azoto, que corresponde ao valor de 12,478 kg. Para obter em volume é necessário dividir a massa de cada um dos compostos pela sua respetiva massa volúmica (kg/m<sup>3</sup>).

A tabela 3.3 apresenta volumes (condições PTN) de oxigénio (O<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), azoto (N<sub>2</sub>) e o ar estequiometricamente necessário e gases após a combustão de 1 kg de carbono [9].

*Tabela 3. 3- Volumes (condições PTN) de oxigénio (O<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), azoto (N<sub>2</sub>) e o ar estequiometricamente necessário e gases após a combustão completa de 1 kg de carbono. Nota: considerou-se válida a adição de volumes.*

<b>Quantidade volumétrica (m<sup>3</sup>, PTN)</b>				
<b>Oxigénio (O<sub>2</sub>)</b>	<b>Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	<b>Azoto (N<sub>2</sub>)</b>	<b>Ar Estequiométrico</b>	<b>Gases formados</b>
1,86 m <sup>3</sup>	1,85 m <sup>3</sup>	7,01 m <sup>3</sup>	8,88 m <sup>3</sup>	8,87 m <sup>3</sup>

### Reação do Hidrogénio



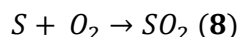
Uma molécula de  $O_2$  é necessária para reagir com duas moléculas de  $H_2$  de modo a dar origem a uma molécula de  $H_2O$ .

. A tabela 3.4 apresenta a quantidade mássica dos constituintes presentes na reação do hidrogénio com o oxigénio. São apresentadas as quantidades mássicas do ar e do azoto (este não participa na reação) [9].

*Tabela 3. 4- Quantidade mássica (kg) do hidrogénio e do oxigénio originando água e azoto como gás de formação da reação de oxidação.*

<b>Quantidade Mássica (kg)</b>				
Hidrogénio ( $H_2$ )	Oxigénio ( $O_2$ )	Água ( $H_2O$ )	Azoto ( $N_2$ )	Ar Estequiométrico
1,00 Kg	7, 94 kg	8,94 Kg	26,26 Kg	34,19 Kg

### Reação do Enxofre



Uma molécula de  $O_2$  é necessária para reagir com uma molécula de S de modo a dar origem a uma molécula de  $SO_2$  e libertar uma determinada quantidade de energia sob a forma de calor. A tabela 3.5 apresenta a quantidade mássica dos elementos presentes na reação do enxofre com o oxigénio [9].

*Tabela 3. 5- Quantidade mássica (kg) de enxofre e de oxigénio originando dióxido de enxofre e azoto como gás de formação da reação de oxidação.*

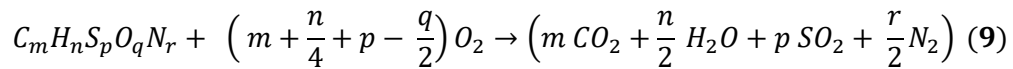
<b>Quantidade Mássica (kg)</b>				
Enxofre ( $S_2$ )	Oxigénio ( $O_2$ )	Dióxido de Enxofre ( $SO_2$ )	Azoto ( $N_2$ )	Ar Estequiométrico
1,00 kg	0,99 kg	1,99 kg	3,30 kg	4,30 kg

Deste modo, os produtos presentes no final da combustão completa sem contabilizar qualquer tipo de excesso de ar serão a soma do dióxido de enxofre com o azoto que corresponde a um total de 5,300 kg.

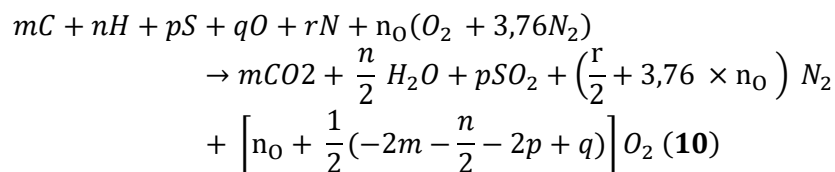
### 3.5.2 Equações para o cálculo de ar estequiométrico e real para um dado combustível sólido.

#### Método 1

A reação de combustão de um dado combustível é representado de forma simplificada pela equação (9), [22].



A reação de combustão com ar em excesso é dada pela seguinte equação:



Para o cálculo do número de moles de oxigénio estequiométrico para a reação de combustão é realizado um balanço molar ao oxigénio de acordo com a seguinte equação [22].

$$n_0 = \frac{m \times 2 + \frac{n}{2} + p \times 2 - q}{2} \quad (11)$$

O cálculo da massa de ar a alimentar é dada a seguinte expressão [21]:

$$m_{ar,estequiométrico} = n_0 \times MM_{O_2} + n_0 \times 3,76 \times MM_{N_2} \quad (12)$$

Para o cálculo da quantidade de ar em base volumétrica às condições normais de temperatura e pressão (T=20°C e P=1 atm) é necessário recorrer à massa volúmica do ar nestas mesmas condições [23].

$$\rho_{ar} = \frac{m_{ar}}{V_{ar}} \quad (13)$$

Como se trata de serrim de madeira, o  $V_{ar}$  é multiplicado por um excesso de ar recomendado de 1,8 a 2.

#### Método 2

De acordo com as necessidades da caldeira, a determinação do caudal de ar real, na prática pode ser de acordo com as equações segundo *Rosin e Fehling* [9] para madeira com teor de humidade <30%. O valor do PCI vem em kcal/kg.

$$V_{ar} \left[ \frac{m^3}{kg} \right] = \left[ \frac{1,01 \times PCI}{1000} + 0,5 \right] \times n \quad (14)$$

$$V_{ar} \left[ \frac{m^3}{h} \right] = V_{ar} \left[ \frac{m^3}{Kg} \right] \times \dot{m}_{comb} \quad (15)$$

Para a determinação do excesso de ar é comum recorrer ao cálculo da razão de equivalência, tratando-se do quociente entre a razão de ar/combustível estequiométrica e a razão de ar/combustível real dada pela equação (16), [24]:

$$\varphi = \frac{(AC)_{estequiométrica}}{(AC)_{real}} \quad (16)$$

Onde:

$$(AC)_{estequiométrico} = \frac{m_{ar,estequiométrico}}{m_{combustível}} \quad (17)$$

$$(AC)_{real} = \frac{m_{ar,real}}{m_{combustível}} \quad (18)$$

Se  $\varphi = 1$  então a relação ar/combustível é estequiométrica

Se  $\varphi < 1$  então a relação ar/combustível apresenta excesso de ar

Se  $\varphi > 1$  então a relação ar/combustível apresenta defeito de ar

Após a determinação da razão de equivalência é possível determinar o coeficiente de excesso de ar ( $e$ ), relacionando o volume real de ar fornecido e o volume de ar necessário para a combustão estequiométrica de uma determinada quantidade de combustível.

A equação (19) corresponde à expressão da determinação do coeficiente de excesso de ar [24].

$$e = \frac{V_{real,ar}}{V_{teórico,ar}} \quad (19)$$

As equações (20), (21), (22) correspondem as equações vulgarmente usadas para a determinação do excesso de ar,  $E$ , [24].

$$E = \frac{V_{excesso,ar}}{V_{teórico,ar}} \quad (20)$$

$$E = \frac{1 - \varphi}{\varphi} \quad (21)$$

$$E = e - 1 \quad (22)$$

### 3.5.3 Métodos de determinação de perdas de carga em tubagens e acessórios.

Para a determinação da perda de carga em tubagens é necessário recorrer ao cálculo da velocidade média do escoamento do fluido dado pela equação 23.

$$v = \frac{Q_{ar}}{A_{secção\text{reta}}} \quad (23)$$

Onde:

$$Q_{ar} = \text{Caudal de ar (m}^3\text{/s)}$$

$$A_{secção\text{reta}} = \text{Área da secção reta da tubagem (m}^2\text{)}$$

Após a determinação da velocidade média do fluido é necessário seleccionar qual o método mais adequado para calcular a perda de carga nas tubagens e nos acessórios.

Quando a equação de Bernoulli (24) é aplicada entre dois pontos de uma tubagem com velocidade constante e com a mesma cota, a perda de carga é dada pela equação (25) [25]:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (24)$$

$$hp = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} \quad (25)$$

A pressão dinâmica é a parcela corresponde à energia cinética do fluido dada pela equação (26) [25].

$$\text{Pressão Dinâmica} = \frac{v_1^2}{2g} \quad (26)$$

O escoamento em uma tubulação pode exigir a passagem do fluido através de vários acessórios, curvas ou mudanças súbitas de área da secção reta que o fluido atravessa. As perdas de carga localizadas tradicionalmente são calculadas de duas formas [26]:

$$\Delta P = K \times \frac{v^2}{2g} \quad (27)$$

Onde o coeficiente de perda K deve ser determinado experimentalmente ou consultado de acordo com o tipo de acessórios e dispositivos existentes.

A perda de carga para a válvula de borboleta depende do ângulo de abertura em que K é o fator de perda de carga do ângulo correspondente. A equação é a mesma como para o cálculo dos acessórios.

A equação 28 determina as perdas de carga numa tubagem de acordo com o tipo de escoamento do fluido. Contudo é necessário descobrir o fator de atrito f, ou pelo diagrama de Moody ou por outros métodos.

$$\Delta P = f \times \frac{Le}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (28)$$

Onde  $Le$  é dado pelo comprimento equivalente de um tubo reto.

Para o cálculo do coeficiente de atrito,  $f$ , geralmente é necessário recorrer ao número de Reynolds,  $Re$  e à rugosidade específica do tubo, dada por  $\frac{\varepsilon}{D}$ .

Para o cálculo do número de Reynolds, a equação dada é a seguinte [26]:

$$Re = \frac{\rho_{ar} \times v \times Di}{\mu_{ar}} \quad (29)$$

Onde  $\mu_{ar}$  é a viscosidade cinemática do ar e o  $Di$  é o diâmetro interno do tubo. A massa volúmica do ar,  $\rho_{ar}$ , e a viscosidade cinemática do ar,  $\mu_{ar}$ , são dadas às condições normais de pressão e temperatura do ar a 20 °C e 1 atm. [26].

Se o  $Re$  for  $< 2000$  então o escoamento é laminar.

Se o  $Re > 40000$  o escoamento é turbulento pois existe atrito originado maioritariamente pela rugosidade que apresenta as tubagens.

Para escoamentos laminares o fator de atrito de *fanning* pode ser determinado pela equação 30 [26]:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (30)$$

Para regime turbulento,  $f$  é em função do diâmetro da tubagem e da rugosidade da parede interna da tubagem, do fluido escoado e a sua velocidade de escoamento. A relação entre a rugosidade da parede e o diâmetro da tubagem ( $k/D$ ) é denominada de rugosidade relativa. O fator de atrito,  $f$ , pode ser calculado pela equação de Colebrook-White para o método de Darcy:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( 0,27 \times \frac{k}{D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (31)$$

Uma maneira mais prática para obter o fator de atrito,  $f$ , é a utilização do *diagrama de Moody*. Este diagrama serve para obter o fator de atrito para qualquer tipo de escoamento, fluido e rugosidade da tubagem. O diagrama de Moody encontra-se representada pela figura 3.11.

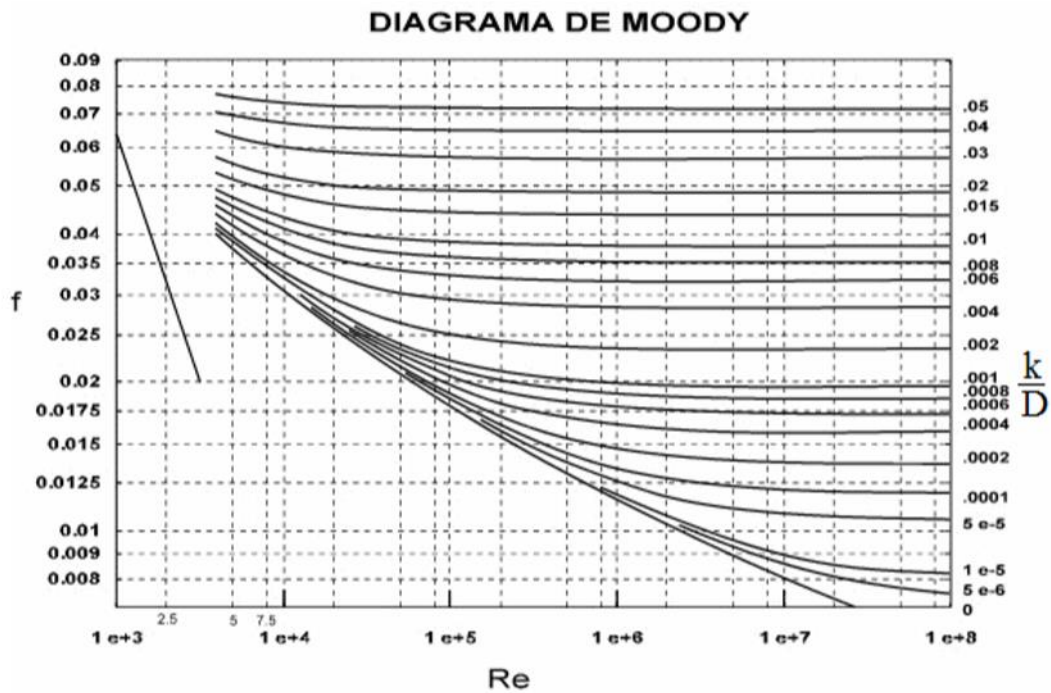


Figura 3. 11- Diagrama de Moody para escoamento laminar e turbulento [27].

No caso da equação 32, esta pode ser utilizada para qualquer tipo de tubagem e material. Resultou de um estudo estatístico cuidadoso no qual foram considerados dados experimentais de diversas fontes e observações feitas pelos próprios autores. Os seus limites de aplicação são os mais amplos: diâmetros de 50 a 300 mm e velocidades de até 3 m/s.

Assim sendo, para o cálculo de perda de carga, em metros de coluna de água, é a equação de Hazen-Williams dada pela equação 32 [26]:

$$\Delta P = \frac{10,64 \times Q^{1,85} \times L}{C^{1,85} \times D^{4,87}} \quad (32)$$

Onde:

$Q_{ar}$  = Caudal de ar ( $m^3/s$ )

$D$  = Diâmetro externo da tubagem (m)

$L$  = Comprimento da tubagem (m)

$C$  = Coeficiente de atrito de Hazen Williams

O coeficiente de atrito de Hazen Williams,  $C$ , depende da natureza do material das paredes dos tubos e é dado pela tabela 3.6.

Tabela 3. 6- Coeficientes de atrito de Hazen Williams [26].

MATERIAL do TUBO	NOVOS	USADOS Cerca de 10 Anos	USADOS Cerca de 20 Anos
Aço corrugado (chapa ondulada)	60	-	-
Aço galvanizado roscado	125	100	-
Aço rebitado novos	110	90	80
Aço soldado, comum (revestido c/ betume)	125	110	90
Aço soldado com revestimento epoxi	140	130	115
Chumbo	130	120	120
Cimento amianto	140	130	120
Cobre	130	135	130
Concreto, bom acabamento	130	-	-
Concreto acabamento comum	130	120	110
Ferro fundido , revestido com epoxi	140	130	120
Ferro fundido revestido com cimento	130	120	105
Grés ceramico,vidrado (manilhas)	110	110	110
Latão	130	130	130
Madeira em aduelas	120	120	110
Tijolos, conduto bem executado	100	95	90
Vidro	140	-	-
Plástico ou PVC	140	135	135

Muitas vezes é mais prático aplicar a equação de Darcy- Weisbachou quando é conhecido o caudal de ar, e não a velocidade. Para isto basta substituir a velocidade pela expressão caudal de ar dividida pela área. Essa operação resulta na equação 33, onde o valor 0,0826 substitui a relação entre as diversas constantes envolvidas [28].

Como são equações determinadas teoricamente elas são dimensionalmente homogêneas, e o coeficiente de perda de carga C é um parâmetro adimensional que resulta da seguinte relação matemática [28].

$$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} = C_f \times \frac{L e}{D} \times \frac{v^2}{2g} = C_f \times \frac{L}{D} \times \frac{Q^2}{\pi^2 D^4} \times \frac{1}{2g} = \frac{8}{\pi^2} \times C_f \times \frac{L Q^2}{D^5} \times \frac{1}{g} =$$

$$0,0826 \times C_f \frac{L \times Q^2}{D^5} \quad (33)$$

Para o cálculo do Cf apresenta-se a fórmula de Swamee Jain, que alia grande simplicidade e é uma ótima aproximação nos regimes de escoamento normalmente encontrados nas instalações de Máquinas Hidráulicas [28].

$$C_f = \frac{1,325}{\left[\ln\left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}\right)\right]^2} \quad (34)$$

### Perdas de carga nos acessórios

Para o cálculo das perdas de carga nos acessórios existentes no percurso do ar primário e secundário é preciso recorrer ao valor do coeficiente K, experimentalmente.

A tabela 3.7 apresenta o coeficiente K para acessórios de tubulação escolhidos [25]. A tabela 3.8 apresenta os diferentes K para a perda de carga na válvula borboleta. Esta válvula apresenta diferentes ângulos de abertura. Para 0° a válvula encontra-se totalmente aberta.

Tabela 3. 7- Coeficiente de carga, K, para acessórios de tubulação escolhidos [25]























Coeficiente K para Acessórios de Tubulação Escolhidos		
Descrição	Esquema	K
ENTRADAS de condutos		0,5
Normal		0,78 a 1,0
de Borda		0,1
convergente		
SAIDAS de condutos		1
Livre		0,9
Afogada		
Curvas		0,25 a 0,40
raio longo		0,20
raio longo, 45°		0,9 a 1,5
cotovelo		0,40
cotovelo, 45°		
Tês		0,60
passagem direta		1,30
passagem lateral		1,80
passagem bilateral		
Registros		0,20
de Gaveta, aberto		10,0
de Globo, aberto		5,0
de Angulo, aberto		
Diversos		0,30
alargamento gradual		0,10
luvas		0,40
junção		0,15
bucha de redução		0,75
crivo		2,50
Válvula de retenção		1,75
Válvula de pé		

Tabela 3. 8-Diferentes valores de coeficiente de carga, ka, para os diferentes ângulos de abertura da válvula borboleta [29].

$a^0$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
K	0,15	0,24	0,52	0,90	1,54	2,51	3,91	6,22	10,8	18,7	32,6

A figura 3.12 representa os diferentes coeficientes de perda de carga em situações de estrangulamento/expansão e em diferentes formas de tubagens.

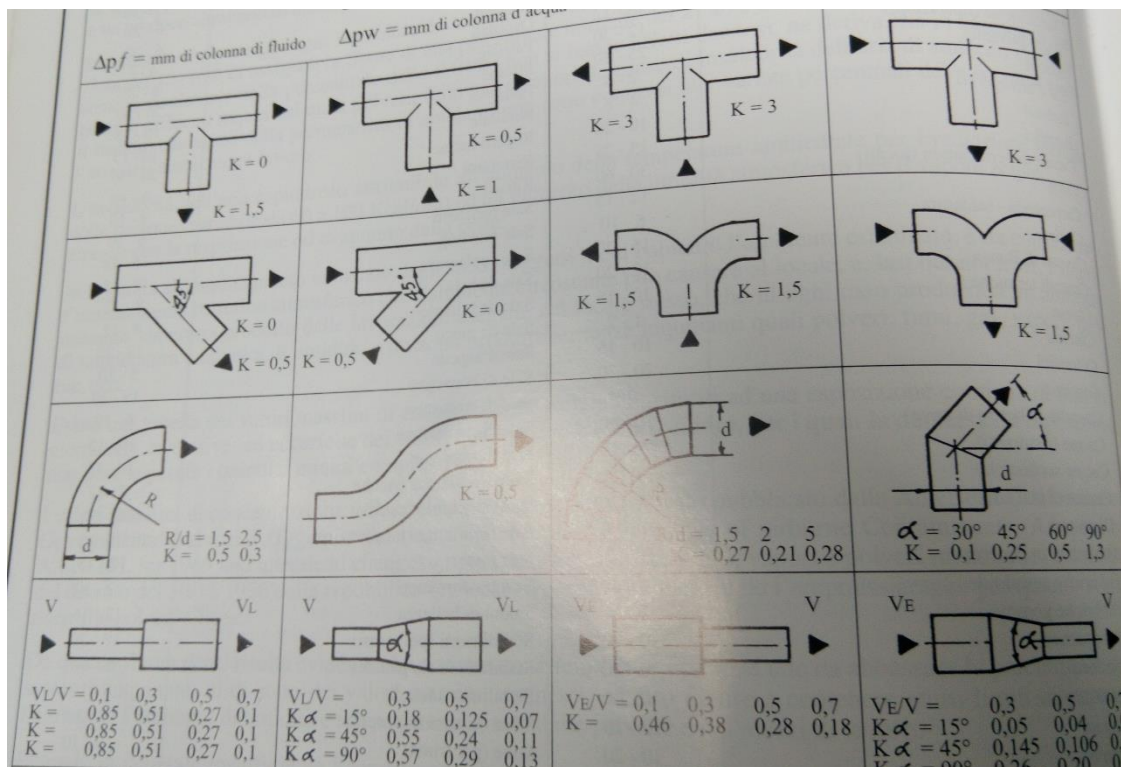


Figura 3. 12– Diferentes valores de K para diferentes acessórios e para tubagens onde ocorre expansões ou estrangulamentos.

## Capítulo 4 – Resultados e Discussão

### 4.1 Caso de Estudo

O objetivo da tese passa pela seleção de dois ventiladores centrífugos de ataque direto acoplados a uma caldeira de tubo de fumos que apresenta potência de 4,0 MW e funciona com um rendimento de aproximadamente 80%. A caldeira é alimentada com determinado biocombustível, mais concretamente o serrim de madeira, que é caracterizado por ter granulometria fina e por apresentar elevado poder calorífico.

Deste modo é feito um conjunto de testes e ensaios para caracterizar o serrim de acordo com o seu conteúdo energético. Após a caracterização da biomassa, efetuaram-se os cálculos necessários para a determinação do ar total estequiométrico que é alimentado à caldeira e que permite a combustão do serrim. O cálculo do ar total é determinante para a escolha dos ventiladores primário e secundário.

Existem três ventiladores, que são acoplados à caldeira vertical de tubo de fumos: um ventilador primário, secundário e terciário. O ventilador de ar primário mistura o ar e a biomassa, entrando diretamente na grelha de suporte da biomassa. O ar secundário e terciário permitem a combustão dos resíduos não queimados que o ar primário não conseguiu queimar na totalidade na reação de combustão inicial. A empresa considera um fator de excesso de 2, no entanto o ventilador primário deverá fornecer 70% do ar calculado com o excesso de 2 e o secundário deverá fornecer 40% do ar calculado com o excesso de 2.

O ventilador de ar primário e secundário realizam trajetos distintos entre si até chegar à entrada da fornalha (ou câmara de combustão) o que será possível visualizar mais à frente. Os ventiladores de ar primário e secundário são os ventiladores que serão objeto de estudo, deixando de fora o terciário.

Na figura 4.1 é possível observar os três ventiladores afixados na caldeira de tubo de fumos de potência igual a 4,0 MW.



Figura 4. 1 -Representação fotográfica dos três ventiladores utilizados na caldeira de tubo de fumos de 4,0 MW. Encontram-se representados o ar primário, secundário e terciário respetivamente.

## **Ventilador Primário**

O ventilador primário, Marca MZ e Modelo GR 560, ao introduzir o ar para dentro da caldeira obriga este a realizar um determinado percurso como se pode visualizar na figura 4.2 e 4.3. O ar sai do ventilador e passa por um coletor, onde no interior deste apresenta duas saídas de ar fazendo com que o caudal de ar primário seja dividido. Após passar por uma das duas saídas, o ar passa por uma curva do coletor e seguidamente por uma válvula de borboleta para controlar a pressão a que o ar percorre.

Após passar pela válvula, o ar é reencaminhado para um tubo de diâmetro 0,150 metros e posteriormente sofre queda de pressão por parte de uma curva de raio igual a 0,150 metros.

Após a curva, o ar atravessa por um tubo retangular de 0,150x0,150m e seguidamente por uma curva retangular com um ângulo igual a 90° e volta a atravessar um tubo retangular 0,125x0,430m. Por fim, o ar atravessa uma coroa circular onde no seu interior apresenta 96 grelhas de iguais dimensões por onde o ar primário se vai dividir. Cada grelha apresenta três secções retas de dimensões 0,012x0,036 m por onde o ar atravessa e segue o seu caminho para o interior da fornalha. Na figura 4.4 é possível visualizar o percurso do ar primário desde a saída do coletor até à saída da grelha.

A tabela 4.1 apresenta as dimensões e o comprimento das tubagens e dos acessórios presentes no percurso do ar primário desde a saída do ventilador até à entrada da fornalha.

*Tabela 4. 1- Dimensões e comprimento das tubagens e acessórios do percurso do ar primário.*

<b>Equipamento</b>	<b>Dimensões (m)</b>	<b>Comprimento (m)</b>
Saída Ventilador	0,350x0,250	0,1
Coletor	0,280x0,350	1,8
Curva coletor/saida	-	-
Válvula borboleta (25°C)	-	-
Tubo Ø150	Ø150	1,23
Curva Ø150 R=D raio longo	-	-
Tubo Retangular	0,150x0,150	0,78
Curva retangular a 90°	-	-
Tubo retangular	0,125x0,430	4,5
Grelha	0,056x0,036	-
Na grelha tem 3 espaços retangulares	0,012x0,036	-

O tipo de material utilizado para as tubagens e acessórios é o aço laminado quente, S235 JR, que apresenta características semelhantes ao tipo de aço comercial.

Nas figuras 4.2 e 4.3 encontram-se representadas, legendadas, cada uma das tubagens e dos acessórios por onde o ar atravessa na caldeira em Auto Cad.

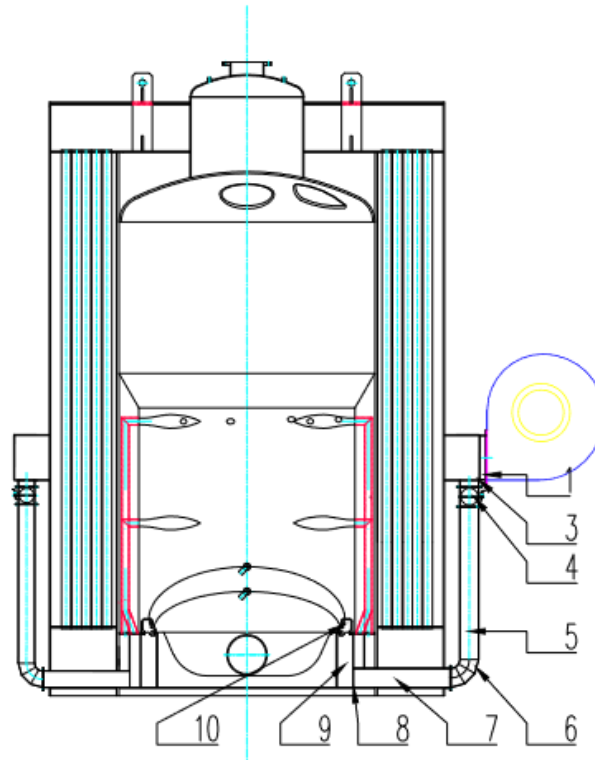


Figura 4. 2- Percurso por onde o ar primário percorre desde a saída do ventilador primário até à entrada da grelha no interior da fornalha da caldeira em Auto Cad 1-Saída do Ventilador, 3- Curva/Saída do coletor, 4-Válvula Borboleta, 5-Tubo de diâmetro 0,150 metros, 6- Curva de diâmetro 0,150 metros, 7 – Tubo Retangular, 8 – Curva Retangular 0,150x0,150, 9 – Tubo Retangular, 10 – Grelha:

A figura 4.3 representa outra vista superior em corte do trajeto do ar no momento em que sai do ventilador. O ar atravessa o coletor e passa por duas entradas de ar. É necessário ter conhecimento do trajeto por onde o ar vai tomar desde a saída do ventilador até à entrada da fornalha devido à existência de perdas de carga de todo o troço que inclui as tubagens e os acessórios. Uma vez sabido o valor da perda de carga de todo o percurso juntamente com o caudal de ar primário necessário para a reação de combustão consegue-se seleccionar o ventilador.

A figura 4.3 representa em corte o trajeto do ar quando sai do ventilador e passa pelo coletor em Auto Cad.

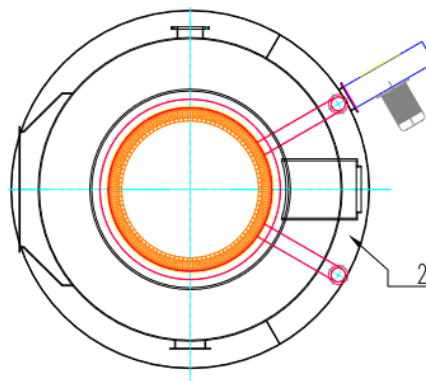


Figura 4. 3 Percurso onde o ar primário percorre desde a saída do ventilador primário passando por duas entradas no interior do coletor em Auto Cad.

A figura 4.4 corresponde ao trajeto do ar primário desde a saída do ventilador até à entrada da fornalha.

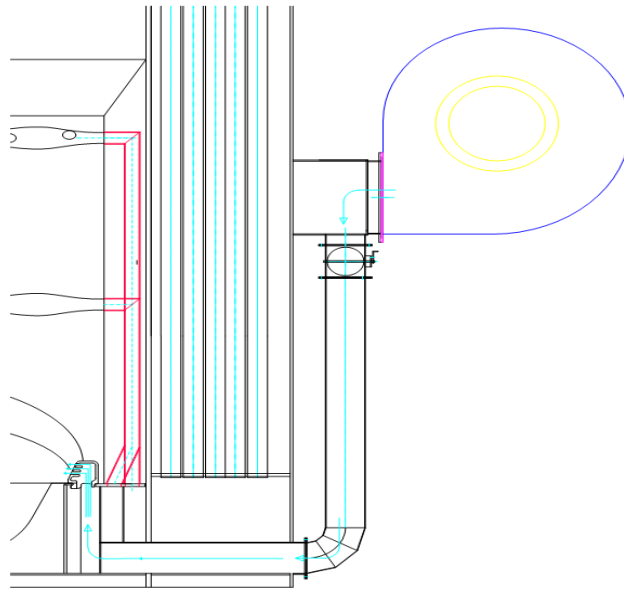


Figura 4. 4 Percurso do ar primário desde a saída do coletor até à saída da grelha momentos antes de entrar na fornalha em Auto Cad.

### **Ventilador Secundário**

O ventilador secundário, Marca MZ e Modelo GR 500 com quatro entradas, o ar inicialmente realiza um percurso semelhante ao ventilador primário A figura 4.5 apresenta a caldeira de tubo de fumos com a respetiva localização do ventilador secundário.

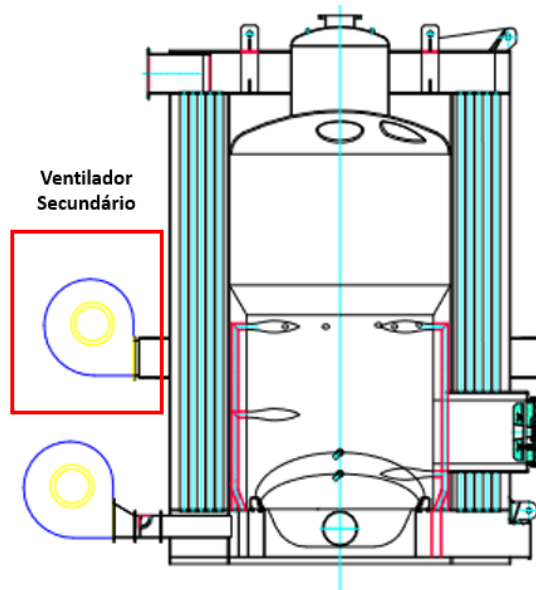


Figura 4. 5- Caldeira tubo de fumos de potência 4,0 MW e respetiva localização do ventilador secundário em Auto Cad.

O ar à semelhança do que acontece no ventilador primário, sai do ventilador secundário e passa por um coletor, onde no interior deste apresenta quatro entradas para o ar, fazendo com que o caudal de ar secundário seja dividido pelas quatro saídas. O ar secundário atravessa o coletor e sai para quatro tubos de saída. Seguidamente o ar atravessa a válvula de borboleta presente para controlar a pressão, e atravessa por um tubo retangular vertical de 0,130x0,130 m. Posteriormente é possível visualizar que no fim do tubo retangular existe uma curva de raio igual ao diâmetro do tubo.

Após a curva, o ar atravessa por um tubo retangular horizontal de 0,160x0,160 metros e seguidamente por uma curva com o ângulo de 90° e volta a atravessar um tubo retangular horizontal. As dimensões deste último tubo retangular são de 0,084x0,430.

Após atravessar este último tubo retangular, o ar sofre um estrangulamento pois atravessam um conjunto de tubos verticais, 24 no total, de diâmetro de 0,053 metros que posteriormente sofre uma queda de pressão devido ao aparecimento de uma curva de 90° continuando o percurso num troço de um metro de tubo de diâmetro de 0,052 metros.

A tabela 4.2 apresenta as dimensões e o comprimento das tubagens e dos acessórios presentes no percurso do ar secundário desde a saída do ventilador até à entrada da fornalha.

*Tabela 4. 2- Dimensões e comprimento das tubagens e acessórios do percurso do ar secundário.*

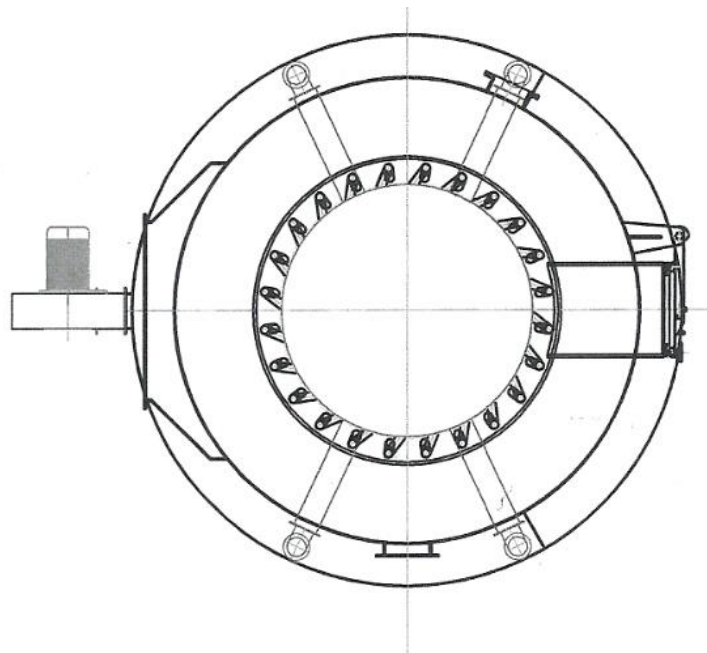
<b>Equipamento</b>	<b>Dimensões (m)</b>	<b>Comprimento (m)</b>
<b>Saída do ventilador</b>	0,350x0,250	0,1
<b>Coletor</b>	0,280x0,350	1,8
<b>Curva coletor/saída</b>	-	-
<b>Válvula borboleta (25)</b>	-	-
<b>Tubo retangular</b>	0,130x0,130	1
<b>Curva Ø130 R=D raio longo</b>	-	-
<b>Tubo retangular</b>	0,160x0,160	1,23
<b>Curva retangular a 90°</b>	-	-
<b>Tubo retangular</b>	0,084x0,430	5,65
<b>T entrada</b>	-	-
<b>Tubo Insuflação</b>	Ø 0,053	1
<b>Curva 90 °</b>	-	-
<b>Tubos Insuflação</b>	Ø 0,052	1

A disposição dos tubos de 0,052 metros de um metro de comprimento pode ser observada na figura 4.6. Na figura são visíveis os tubos de ar secundário e ar terciário. Os tubos relativos ao ar secundário são os tubos de comprimento mais curto. Logo a seguir é possível visualizar os tubos mais compridos de ar terciário.



*Figura 4. 6- Visualização dos tubos de 0,052 metros de diâmetro onde sai o ar secundário e os tubos de ar terciário de maior comprimento.*

A figura 4.7 representa um corte horizontal da caldeira mostrando o circuito do ar secundário.



*Figura 4. 7- Representação do percurso do ar secundário (ventilador GR 50) onde é possível visualizar a presença de 24 tubos de 0,052 metros de diâmetro em Auto Cad.*

No seu interior é possível visualizar os 24 tubos com diâmetro interno igual a 0,052 metros onde o caudal do ar secundário vai ser dividido. Este percurso é importante para o cálculo da queda de pressão das tubagens e dos acessórios.

Com o caudal de ar secundário e a queda de pressão é possível selecionar o melhor modelo do ventilador.

## 4.2 Caracterização da Biomassa

### Análise Imediata

A análise imediata (ou próxima) é constituída por um conjunto de análises que englobam determinar o teor de humidade, teor de cinzas, teor de voláteis e carbono fixo.

- **Humidade**

Numa primeira fase de acordo com a norma NREL/TP-510-42621 foi possível determinar a humidade da biomassa à temperatura de 105 °C.

Determinou-se o cálculo do teor de humidade e obtiveram-se os seguintes valores na tabela 4.3. Os cálculos do teor de humidade encontram-se representados no Anexo A.1.

*Tabela 4. 3- Valores obtidos do teor de humidade das réplicas 1, 2 e seu valor médio comparativamente com o valor empírico do teor de humidade (%) e desvio relativo (%).*

Réplicas	Teor de Humidade (%)	Teor de Humidade Empírico (%)	Desvio Relativo (%)
1	5,6	5,8	3,5
2	5,5		
<b>Média</b>	5,6		

Após determinar o valor do teor de humidade da amostra, conclui-se que a biomassa apresenta humidade de 5,6 % e encontra-se perto do valor empírico de 5,8 % da amostra de serrim, o que torna o valor da humidade encontrada na biomassa um valor plausível e satisfatório.

- **Teor de Cinzas**

Seguidamente, procedeu-se à determinação do teor de cinzas existente na amostra da biomassa segundo a norma NREL/TP-510-42622 e tal como para a determinação da humidade foram efetuadas duas réplicas.

Após determinar os valores relativos da massa antes e após de ter sido inserida na mufla, procedeu-se ao cálculo do teor de cinzas e obteve-se os seguintes valores apresentados na tabela 4.4. Os cálculos do teor de cinzas encontram-se representados no Anexo A.1.

*Tabela 4. 4- Valores obtidos do teor de cinzas das réplicas 1, 2 e seu valor médio comparativamente com o valor empírico do teor de cinzas (%) e desvio relativo (%).*

Réplicas	Teor de Cinzas (%)	Teor de Cinzas Empírico (%)	Desvio Relativo (%)
1	0,98	1,2	20
2	0,93		
<b>Média</b>	0,96		

Após determinar o valor do teor de cinzas da amostra, conclui-se que a biomassa apresenta teor de cinzas correspondente ao valor de 0,96 % e encontra-se perto do valor empírico de 1,2 % o que torna o valor das cinzas encontrada na biomassa um valor plausível e satisfatório.

- **Matéria Volátil**

A análise da matéria volátil é realizada com base numa metodologia semelhante que as cinzas. O seu valor empírico é correspondente ao valor de 75,5 % de acordo com o boletim de ensaio previamente realizado da amostra.

- **Carbono Fixo**

A quantidade de carbono fixo é determinada pela diferença para 100 da soma dos restantes elementos como o teor de humidade, teor de cinzas e da matéria volátil. Deste modo o valor corresponde ao carbono fixo é igual a 17,72%.

### Análise Última

A análise última é caracterizada por um conjunto de ensaios que englobam determinar o poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI) da amostra de biomassa, a quantidade de carbono, azoto, enxofre, oxigénio e hidrogénio.

- **Poder Calorífico Superior (PCS)**

A determinação do poder calorífico superior da amostra de biomassa foi realizada numa bomba calorimétrica que permite determinar o PCS de acordo com a quantidade de biomassa que é inserida no aparelho com uma quantidade de água fixa que contém oxigénio a diferentes condições de pressão e temperatura. A norma utilizada para determinar o PCS é a norma ASTM D5865.

A tabela 4.5 representa o valor médio das duas réplicas para cálculo do seu PCS em cal/g e kJ/kg respetivamente.

*Tabela 4. 5 Valores médios obtidos para a determinação do poder calorífico superior das duas réplicas (cal/g e kJ/kg).*

<b>PCS (cal/g)</b>	<b>PCS (kJ/kg)</b>
4299	17969

O valor obtido para o PCS corresponde ao valor de 17969,8 kJ/kg não se encontrando muito distante do valor empírico que corresponde ao valor de 18 517 kJ/kg.

- **Poder Calorífico Inferior (PCI)**

O poder calorífico inferior (PCI) é possível ser determinado sabendo a composição da humidade e do hidrogénio que provém da água existente na biomassa. Para o cálculo é necessário recorrer ao calor latente de vaporização da água (L). O valor obtido para o PCI foi de 16521,14 kJ/kg.

- **Determinação do Carbono Total e Carbono Orgânico**

Para a determinação do carbono total orgânico e inorgânico da amostra de biomassa foi necessário recorrer a um equipamento capaz de determinar o carbono total designado por TOC. Realizaram-se duas réplicas do ensaio sendo calculado primeiramente a quantidade de carbono orgânico e seguidamente a quantidade de carbono inorgânico. Em todas as réplicas realizadas concluiu-se que a amostra não apresentava na sua composição carbono inorgânico e por este motivo diz-se que toda a quantidade de carbono determinada corresponde somente a carbono orgânico.

A temperatura de operação do TC e IC (Carbono Total e Carbono Inorgânico) correspondem à temperatura de 900 °C e 200°C e os elementos utilizados como padrão para as curvas de calibração são respetivamente glicose e carbonato de sódio anidro.

A tabela 4.6 representa a massa da amostra (mg) e o valor da concentração obtida nas unidades percentuais (% m/m) e respetivo valor médio das duas réplicas.

*Tabela 4. 6- Resultados dos ensaios de determinação do TC e TOC.*

1ª Réplica		2ª Réplica			Média	
TOC (mg)	Concentração (% m/m)	TOC (mg)	Concentração (% m/m)	Concentração (% m/m)		
M <sub>amostra</sub>	14,13	37,10	M <sub>amostra</sub>	30,37	36,79	36,95

O valor obtido para a determinação da quantidade de carbono total corresponde ao valor médio das duas réplicas e correspondente a 36,95 %. O seu valor empírico corresponde a 47%. Os valores obtidos da concentração da amostra foram obtidos diretamente pela leitura direta do equipamento.

O valor obtido para o carbono total comparativamente com o valor do carbono elementar presente na biomassa (tabela 4.6) é 1,33 mais pequeno. O valor obtido do TOC corresponde à quantidade de carbono total existente na amostra, ou seja, orgânico e inorgânico. No entanto conclui-se que a quantidade de carbono total corresponde somente à quantidade de carbono orgânico, pois não há carbono inorgânico. No caso do carbono elementar o seu valor de 49,3% corresponde à existência do carbono orgânico e inorgânico e por este motivo o seu valor é superior.

#### Composição elementar

A composição elementar corresponde à quantidade existente de determinados compostos presentes sob a forma elementar de uma dada biomassa. Os elementos como: C (carbono), H (hidrogénio), N (azoto), S (enxofre), O (oxigénio) e Cl (cloro) são fundamentais para os balanços energéticos, mássicos e ainda para a realização de dimensionamentos.

Na tabela 4.7 encontram-se representados os valores obtidos da análise elementar de uma amostra de 100 g de serrim (% m/m) com os valores já tabelados (padrão) da mesma composição elementar.

Tabela 4. 7- Composição da análise elemental realizada aos compostos C (carbono), H hidrogénio), N (azoto), S (enxofre), O (oxigénio) e Cl (cloro) em percentagem (% m/m).

Compostos	Análise Elemental Padrão Base Seca (% m/m)	Análise Elemental Base Seca (% m/m)
<b>C</b>	47,0	49,30
<b>H</b>	6,2	6,5
<b>N</b>	3,9	3,5
<b>O</b>	41,6	40,7
<b>S</b>	0,08	ND
<b>Cl</b>	0,056	ND <sup>1</sup>

Pretende-se avaliar em termos percentuais a quantidade elemental de cada elemento necessário para a reação de combustão da biomassa. Para a determinação do teor (%m/m) de carbono, hidrogénio, azoto e de oxigénio obteve-se o valor de 49,30 %, 6,50 %, 3,5 %, 40,7 % sendo que este último valor foi calculado por diferença dos restantes elementos.

### 4.3 Determinação do caudal de ar a fornecer à caldeira

#### **Método 1**

Uma vez conhecida a composição elemental da biomassa é possível determinar a reação de combustão completa com excesso de ar.

Na tabela 4.8 são apresentados os dados relativos à potência consumida admitida da caldeira, ao rendimento máximo admitido que esta funciona, o valor do poder calorífico inferior e ainda o caudal de combustível utilizado no momento do funcionamento da caldeira. O cálculo referente à massa de combustível utilizado na caldeira encontra-se presente no anexo A.3.

Tabela 4. 8- Valores da potência consumida (MW), do rendimento admitido pela caldeira (%), PCI (cal/g) e a massa de combustível utilizado para a reação de combustão (kg) que ocorre na caldeira.

Potência Consumida, $P_{cons}$	Rendimento Admitido, $\eta$	PCI	Caudal combustível utilizado, $\dot{m}_{comb.}$
<b>MW</b>	<b>%</b>	<b>cal/g</b>	<b>Kg/h</b>
<b>4,0</b>	<b>80,0</b>	<b>3950,0</b>	<b>1090</b>

Para determinar a massa de ar estequiométrica é necessário calcular a massa de combustível utilizado primeiro. Deste modo é necessário recorrer ao rendimento máximo que a caldeira pode trabalhar de acordo com o valor de PCI do combustível e a potência consumida que a caldeira opera

Conclui-se que é necessário um caudal de combustível de 1090 kg/h para a caldeira poder operar a 80 %. A partir do caudal de combustível utilizado torna-se possível calcular a quantidade mássica de cada composto por kg de combustível.

<sup>1</sup> ND – Não Detetável

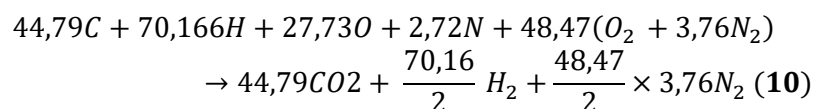
Conhecida a composição mássica da biomassa é necessário calcular a composição molar de cada composto para se poder utilizar estes valores como coeficientes da reação de combustão com o ar.

Na tabela 4.9 são apresentados os valores da composição elementar mássica e dos caudais mássicos e molares de cada elemento correspondentes ao caudal mássico de biomassa a tratar na reação de combustão com o ar e os exemplos de cálculos encontram-se no Anexo A.3.

*Tabela 4. 9- Resultados dos cálculos intermédios para a obtenção em base volumétrica dos diferentes compostos presentes na reação de combustão.*

	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>O</b>	<b>N</b>
<b>Composição Elementar</b>	0,493	0,065	0,407	0,035
<b>Caudal Mássico (kg/h)</b>	537,46	70,86	443,70	38,16
<b>Caudal Molar (kmol/h)</b>	44,79	70,16	27,73	2,72

A reação de combustão estequiométrica fica de acordo com a equação seguinte e o seu respetivo exemplo de cálculo encontra-se no Anexo A.3.



Na tabela 4.10 são apresentados os valores da quantidade molar, mássica e volumétrica do ar obtidos a partir dos cálculos estequiométricos na reação de combustão. Encontra-se exemplificado estes mesmos cálculos no Anexo A.3.

*Tabela 4. 10- Valores obtidos para a o caudal molar do oxigénio e os caudais mássico e volumétrico do ar.*

	Caudal molar de oxigénio $n_0$ (kmol/h)	48
<b>Ar</b>	Caudal estequiométrico Mássica (Kg/h)	6653
	Caudal estequiométrico Volumétrica (m <sup>3</sup> /h)	5436
	Caudal Volumétrico ar com um fator de excesso de 1,8 [30]	9785

## Método 2

O cálculo do ar total real para a caldeira de tubo de fumos foi efetuado com a utilização das equações 14 e 15. A quantidade de ar real utilizada para a reação de combustão, com um fator de excesso de ar de 2, corresponde ao valor total de 9708 m<sup>3</sup>/h. Para a seleção dos ventiladores vai ser utilizado o método 2 pois é o método utilizado pela empresa.

No ponto 4.4 discutir-se-á os resultados obtidos sobre a seleção dos ventiladores. Os ventiladores utilizam o ar em excesso para darem continuidade à reação de combustão da biomassa sólida permitindo a sua combustão completa.

#### 4.4 Perda de carga nas condutas e Seleção dos ventiladores

Após o cálculo do caudal de ar para a reação de combustão é necessário repartir o caudal de ar pelos três ventiladores existentes na caldeira sendo que só o primário e secundário serão selecionados. Conforme referido no ponto 4.1 o ventilador primário deverá fornecer 70% do ar com um fator de excesso de 2 e o ventilador secundário deverá fornecer 40% desse mesmo ar [30].

Para a seleção dos ventiladores de ar primário e secundário, de acordo com as curvas características, é importante recorrer à determinação do caudal de ar e à determinação da queda de pressão que o ventilador apresenta desde que o ar saí do ventilador até ao momento em que entra na fornalha.

Estes dois parâmetros permitem descobrir qual o valor da eficiência e qual a potência a que os ventiladores operam.

##### Ventilador de Ar Primário

O ventilador fornece 6795 m<sup>3</sup>/h e deve vencer uma perda de carga total de 504 mm.c.a.

Para o cálculo da perda de carga total das tubagens e dos acessórios foi necessário recorrer a um conjunto de cálculos auxiliares que permitissem chegar ao valor da perda de carga total.

Na tabela 4.11- encontram-se apresentados as tubagens e os acessórios utilizados, o caudal de ar primário em m<sup>3</sup>/h, e a perda de carga total em mm.c.a. Os cálculos encontram-se discriminados no Anexo A.4

*Tabela 4. 11- Resultados obtidos de caudal de ar primário (m<sup>3</sup>/h) e perda de carga (mm.c.a) de cada um dos acessórios e das tubagens para o dimensionamento do ventilador primário.*

Tubagens e Acessórios	Caudal ( $\frac{m^3}{h}$ )	Perda de Carga (mm.c.a)
Saída Ventilador	6795	0,2
Coletor	3397	1
Curva coletor		8
Válvula borboleta (25°C)		14
Tubo Ø150		24
Curva Ø150 R=D raio longo		69
Tubo retangular 0,150 x 0,150 m		9
Curva retangular a 90°		161
Tubo retangular 0,125 x 0,430 m		7
Grelha	70	2
Grelha (3 secções retangulares)	70	30

Ao valor das perdas de carga total é ainda adicionado, pela empresa, o valor da pressão dinâmica do tubo ou do acessório que apresenta maior velocidade de escoamento, ou seja, maior pressão dinâmica. Neste caso em concreto é adicionado o valor da pressão dinâmica do tubo de 0,150 m uma vez que se trata do tubo que apresenta maior velocidade. No Anexo A.4 é possível verificar que o tubo de 0,150 m é aquele que apresenta maior velocidade de escoamento e conseqüentemente maior pressão dinâmica.

A figura 4.8 apresenta o resultado obtido para a curva característica do ventilador de ar primário.

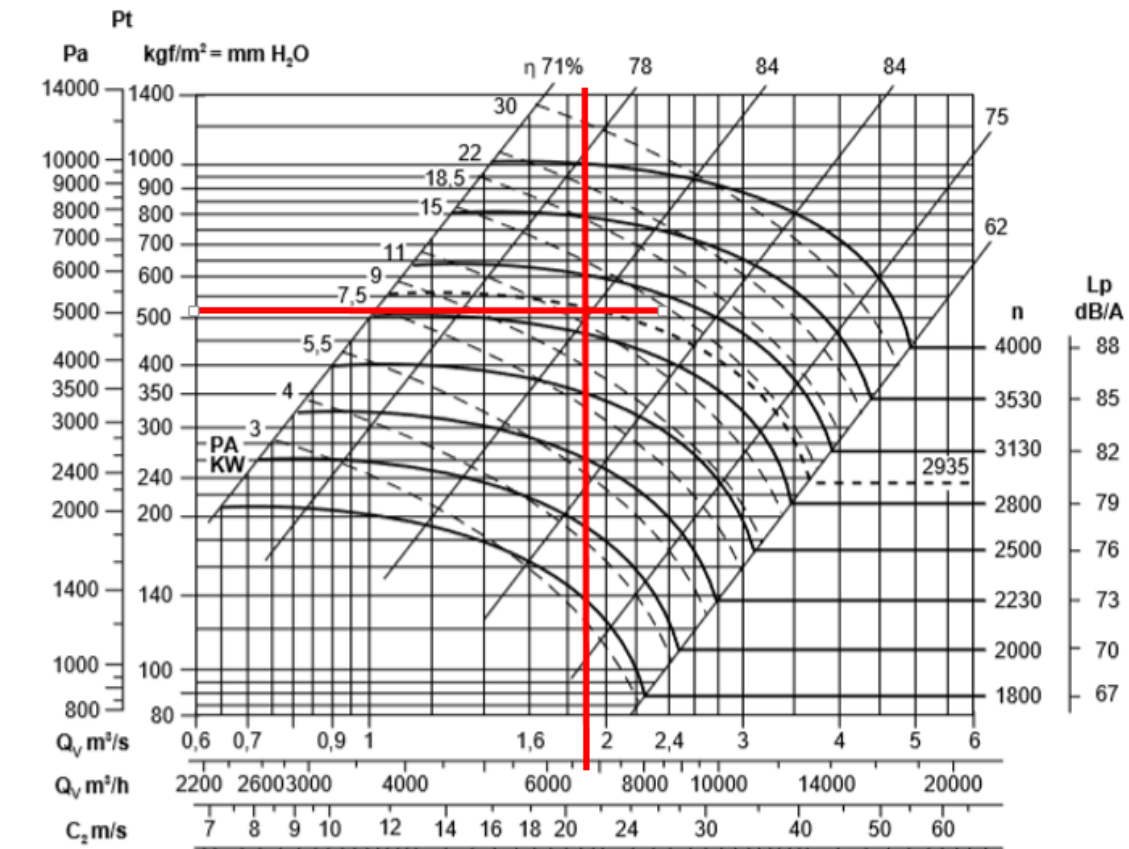


Figura 4. 8- Curva Caraterística para o caudal de ar primário igual a 6795 m³/h e perda de carga total igual a 504 mm.c.a do ventilador GR 560/2.

De acordo com visualizado na figura 4.8 pode-se concluir que o ventilador apresenta na intersecção do caudal de ar primário e perda de carga total valores de eficiência igual a 84%. O valor obtido para as rotações encontra-se dentro das 2800 e as 2935 rotações logo o valor das rotações obtido é o superior de 2935 rotações. O valor obtido de potência para estas rotações corresponde ao valor de potência de 7,5 KW.

O ventilador, de velocidade variável, selecionado pela empresa, marca MZ e modelo GR 560/2, é adequado para as necessidades, caudal de ar e perda de carga, determinadas neste trabalho.

### Ventilador de Ar Secundário

O ventilador consome 3883 m<sup>3</sup>/h e apresenta perda de carga total de 190 mm.c.a.

Na tabela 4.12 encontram-se apresentados as tubagens e os acessórios utilizados, o caudal de ar secundário em m<sup>3</sup>/h, e a perda de carga total em mm.c.a. Os cálculos encontram-se discriminados no Anexo A.4

*Tabela 4. 12 - Resultados obtidos de caudal de ar secundário (m<sup>3</sup>/h) e perda de carga (mm.c.a) de cada um dos acessórios e das tubagens para o dimensionamento do ventilador secundário.*

Tubagens e Acessórios	Caudal ( $\frac{m^3}{h}$ )	Perda de Carga (mm.c.a)
Saída Ventilador	3883	0,06
Coletor	970	0,06
Curva coletor		0,7
Válvula borboleta (25°C)		1,2
Tubo Retangular 0,130 x 0,130 m		1,9
Curva Ø130 R=D raio longo		6,2
Tubo retangular 0,160 x 0,160 m		0,8
Curva retangular a 90°		99
Tubo retangular 0,084 x 0,430 m		3
T entrada		4
Tubo Insuflação 0,053		9
Curva 90 °	161	25
Tubos Insuflação 0,052 m		11

No cálculo das perdas de carga total é ainda adicionado, o valor da pressão dinâmica do tubo ou do acessório que apresenta maior velocidade de escoamento, ou seja, maior pressão dinâmica. Neste caso em concreto é adicionado o valor da pressão dinâmica dos tubos de insuflação de 0,052 m uma vez que se trata dos tubos que apresentam maior velocidade. No Anexo A.4 é possível verificar que os tubos de 0,052 m são aqueles que apresentam maior velocidade de escoamento e conseqüentemente maior pressão dinâmica.

A figura 4.9 apresenta o resultado obtido sobre a curva característica do ventilador de ar secundário.

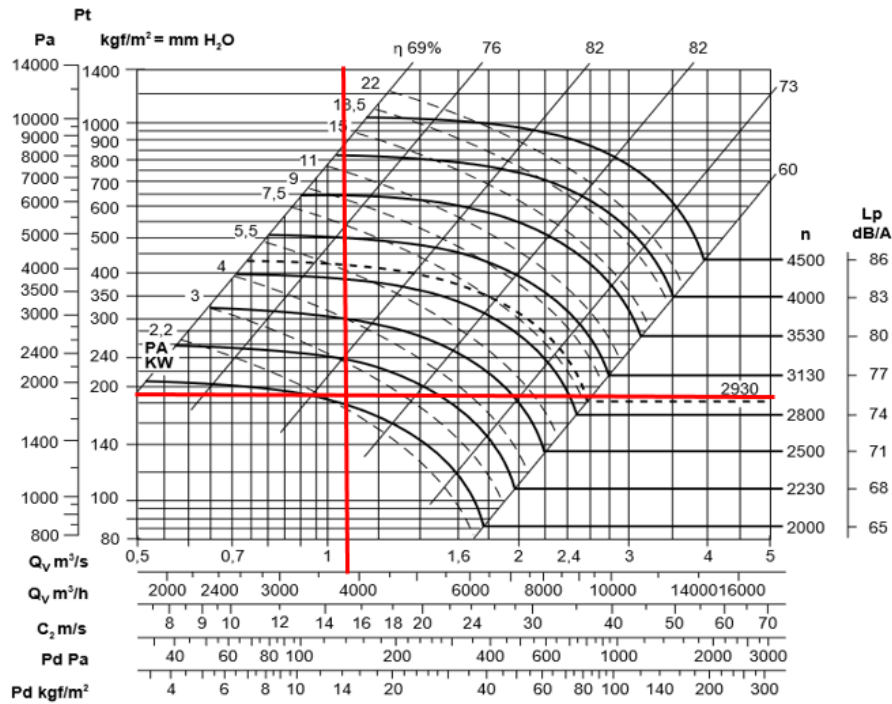


Figura 4. 9- Curva Característica para o caudal de ar secundário igual a 3883 m<sup>3</sup>/h e perda de carga total igual a 190 mm.c.a do ventilador GR 500.

De acordo com visualizado na figura 4.9 pode-se concluir que o ventilador apresenta na intersecção do caudal de ar secundário e perda de carga total valores de eficiência igual a 82%. Deverá funcionar com uma velocidade de rotação de 2000 e uma potência de 2,2kW.

O ventilador de ar secundário selecionado pela empresa foi da Marca MZ e modelo GR 500 não parece o mais adequado para as condições determinadas neste trabalho pois estaria a funcionar na velocidade de rotação mínima, o que limitaria possíveis alterações necessárias.



## Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos Futuros

O objetivo da presente tese, que decorreu na empresa Silvino Lindo Ibérica – S.A, passa pela seleção de dois ventiladores de tiragem forçada, que fornecem ar primário e ar secundário a uma caldeira de tubo de fumos que opera a um rendimento de 80% e de potência igual a 4,0 MW.

Um outro objetivo passa pela comparação entre os ventiladores selecionados com os ventiladores efetivamente instalados na caldeira. Contudo, foi importante conhecer como funciona a caldeira e quais os seus componentes principais assim como as suas funções.

Para atingir estes objetivos foi necessário conhecer o biocombustível utilizado e as suas principais características. O serrim de madeira é o biocombustível utilizado para este tema. Conclui-se que o serrim de madeira apresenta granulometria muito fina o que faz com que seja altamente volatilizável. Conclui-se ainda que o serrim apresenta um valor de PCI de 16521 kJ/kg e que a quantidade de combustível que a caldeira consome corresponde ao valor de 1090 Kg/h.

A empresa para o cálculo do caudal mássico de combustível admite que a caldeira funciona a uma eficiência de 80%.

Após a determinação do caudal de combustível determinou-se a quantidade de ar estequiometricamente necessária para a combustão completa da biomassa por dois métodos. O primeiro método consistiu no cálculo da quantidade de ar necessária para a reação de combustão completa do serrim tendo em conta a sua análise elementar e a sua estequiometria. O segundo método consiste na utilização de uma equação empírica desenvolvida para o cálculo do volume de ar necessária para a combustão completa da madeira com uma composição elementar característica. Os valores obtidos pelos dois métodos são da mesma ordem de grandeza:  $9,8 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/h considerando um fator de excesso de ar de 1,8 e  $9,7 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/h considerando um excesso de ar de 2. Como a empresa utilizou o segundo método, foi esse o método considerado neste trabalho.

Deste modo, o caudal de ar total utilizado foi de 9708 m<sup>3</sup>/h para a alimentação da caldeira.

A caldeira apresenta na sua instalação três ventiladores de ar primário, secundário e terciário, contudo apenas serão selecionados os dois primeiros. Através da informação fornecida pela empresa, o ventilador primário deverá fornecer 70% do ar previamente calculado considerando um fator de excesso de 2 e o ventilador secundário deverá fornecer 40% desse mesmo ar, obtendo-se caudais de ar de 6795 m<sup>3</sup>/h e 3883 m<sup>3</sup>/h respetivamente Este facto mostra que o excesso de ar considerado pela empresa é efetivamente superior a 2.

Para cumprir o objetivo, realizou-se a determinação das perdas de carga que o ar necessita de vencer desde a saída dos ventiladores até à entrada da fornalha e os valores obtidos para a perda carga foram de 504 e 190 mm.c.a

Após a determinação do caudal de ar que os ventiladores fornecem e a perda de carga que o ar sofre, procedeu-se, e seguidamente procedeu-se com o auxílio das curvas características dos ventiladores instalados pela empresa SML

Para o ventilador primário obteve-se uma eficiência do ventilador de 86% e uma potência de 7,5 KW que corresponde ao número de rotações nas condições ótimas de 2935 rpm. Conclui-se que o ventilador MZ GR 560/2 é efetivamente uma boa escolha.

No caso do ventilador secundário tal já não se verifica. Para o caudal de ar secundário e perda de carga respetiva obtém-se um valor de eficiência e 82% e uma potência de 2,2 KW que corresponde a um número de rotações de 2000 rpm. O ventilador selecionado pela empresa SML é o ventilador da marca MZ modelo GR 500/2, no entanto não parece o mais adequado para as condições determinadas neste trabalho pois estaria a funcionar na velocidade de rotação mínima, o que poderá limitar possíveis alterações operacionais.

Não foi possível determinar o excesso de ar com que efetivamente a caldeira vai trabalhar pois não foi disponibilizado, por parte da empresa, qual o caudal de ar terciário.

Como proposta de trabalhos futuros, sugere-se selecionar o ventilador terciário e determinar portanto em que condições é que este trabalha tal como descobrir o valor de excesso de ar que fornece à caldeira.

Uma outra proposta passa pela determinação da perda de carga que o ar que percorre a chaminé da caldeira sofre e se tem alguma influência significativa para o cálculo da perda de carga total do ar que é fornecido pelos ventiladores e verificar qual a influência na sua escolha.

## Bibliografia

- [1] A. L. Marques, “Utilização Energética da Biomassa em Portugal: Caso de estudo da tratolixo.,” Lisboa, 2015.
- [2] J. Madeira, “Formação e Emissão de Partículas numa Caldeira Doméstica Alimentada a Pellets,” Lisboa, 2011.
- [3] S. Van Loo e J. Koppejan, *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, USA, Sterling, VA: Earthscan, 2008.
- [4] “Atlas of Energy,” [Online]. Available: <http://energyatlas.iea.org/#!/tellmap/-1076250891/3>. [Acedido em 18 Abril 2018].
- [5] J. Garrido, “Química e Caracterização da Biomassa, Apontamentos,” 2016-2017. [Online]. [Acedido em 19 Abril 2018].
- [6] S. L. -. I. S.A, “SML- Silvino Lindo Ibérica S.A,” [Online]. Available: <https://www.sml.pt/empresa/>. [Acedido em 2 Maio 2018].
- [7] M. Melo, “Implementação de uma central a biomassa. Análise de sustentabilidade ambiental e económica.,” Lisboa, 2009.
- [8] C. Barros, “Produção de pellets para a valorização de resíduos provenientes da indústria corticeira.,” Minho, 2013.
- [9] F. Juanico, *Geradores de calor*, Lisboa: Centro Europeu para a Economia e Gestão da Energia da Indústria, Lda..
- [10] L. Machado, “Fontes e Conversão de Energia - Apontamentos "Geradores de Vapor",” [Online]. [Acedido em 26 abril 2018].
- [11] W. A. Bizzo, “Geradores de Vapor,” em *Geração, Distribuição e Utilização do Vapor*, p. 15.
- [12] C. d. u. caldeira, “SlideShare,” [Online]. Available: <https://pt.slideshare.net/lcmartinelli1/gv-03-caldeiras-componentes>. [Acedido em 16 maio 2018].
- [13] T. Oliveira, “Design Para Superfícies Sensíveis: desenvolvimento de superfícies para uma caldeira industrial,” Viana do Castelo, 2015.
- [14] A. Santos, “Dimensionamento de uma caldeira com produção de água quente queimando peletes de biomassa.,” Porto, 2009.
- [15] “Mecânica Industrial,” [Online]. Available: <https://www.mecanicaindustrial.com.br/158-o-que-e-uma-valvula/>. [Acedido em 14 maio 2018].
- [16] P. C. R. Altafini, “Curso de Engenharia Mecânica: disciplina de máquinas térmicas. Apostila sobre caldeiras.,” 2012.

- [17] B. Gustavo Silveira, "Estudo do efeito do sistema sobre a operação de ventiladores," São Paulo, 2013.
- [18] "Ventiladores: Conceitos Gerais, Classificação, Curvas Características e as 'Leis dos Ventiladores'," [Online]. [Acedido em 2018 setembro 27].
- [19] J. Z. R. d. S. Pagnossin, "Tiragem," Santa Maria, Brasil, 2008.
- [20] U. States, "Patent Application Publication". Estados Unidos Patente 2008/0149010 A1 , 26 junho 2008.
- [21] I. N. O. V. Sérgio Henrique Saavedra Martinelli, "Detecção de defeitos via redes neurais: aplicação - sistema de ar secundária de uma caldeira de recuperação química.," p. 11.
- [22] W. A. Bizzo, "EM 722 - Geração, Distribuição e Utilização de vapor," [Online]. Available: <http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP1.pdf>. [Acedido em 2018 Setembro 20].
- [23] Y. A. Çengel, *Introductions to Thermodynamics and Heat Transfer*, WCB/McGraw-Hill, 2012.
- [24] R. Pilão, *Fenómenos de conversão de energia - FCONV "Aulas combustíveis"*, Porto, 2016-2017.
- [25] CEFET-BA, *Mecânica dos Fluidos- Equação de Bernoulli para fluidos reais*.
- [26] P. A. W. P. Evangelista, "Condução de água (cont.)."
- [27] *Gráficos e tabelas para as disciplinas de STFLU e TRFCA - ISEP*, 2006.
- [28] M. F. Barral, "Perda de Carga".
- [29] " Aula 7 - Perda de Carga Localizada," [Online]. [Acedido em 8 outubro 2018].
- [30] F. Juanico, "Poupança de energia na central térmica," em *Seminário*, Cenertec, 1994.

## Anexos

### Anexo A.1 – Ensaio relativo à caracterização da biomassa

#### Teor de Humidade

Na tabela A.1 são apresentados os valores obtidos dos ensaios relativos à massa de amostra, antes e depois de esta ter sido inserida na estufa a 105 °C. Para cada ensaio foram realizadas duas réplicas.

*Tabela A. 1 - Conjunto de resultados relativos à medição do teor de humidade da biomassa antes e depois de se ter submetido na estufa a 105°C segundo a norma NREL/TP-510-42621 das duas réplicas*

1ª Réplica			2ª Réplica		
Antes		Depois	Antes		Depois
Mc <sub>cadinhoseco</sub> (g)	48,39	-	Mc <sub>cadinhoseco</sub> (g)	52,07	-
M <sub>amostra</sub> (g)	5,16	-	M <sub>amostra</sub> (g)	5,32	-
M <sub>cadinho+amostra</sub> (g)	53,56	53,25	M <sub>cadinho+amostra</sub> (g)	57,39	57,09

#### Teor de Cinzas

Na tabela A.2 são apresentados os ensaios relativos à determinação da massa de cinzas da amostra, antes e depois de esta ter sido inserida na mufla a 575 °C.

*Tabela A. 2- Conjunto de resultados relativos à medição do teor de cinzas da biomassa antes e depois de se ter submetido na mufla a 575°C segundo a norma NREL/TP-510-42622 das duas réplicas.*

1ª Réplica			2ª Réplica		
Antes		Depois	Antes		Depois
Mc <sub>cadinhoseco</sub> (g)	41,07	-	Mc <sub>cadinhoseco</sub> (g)	45,13	-
M <sub>amostra</sub> (g)	5,05	-	M <sub>amostra</sub> (g)	5,23	-
M <sub>cadinho+amostra</sub> (g)	46,12	41,11	M <sub>cadinho+amostra</sub> (g)	50,36	45,18

### Poder Calorífico Superior (PCS)

A tabela A.3 representa os valores da biomassa medidos antes de serem colocados na bomba calorimétrica e os valores obtidos do PCS segundo a norma ASTM D5865.

*Tabela A. 3- Valores obtidos do ensaio realizado para a determinação do poder calorífico superior (PCS) para as duas réplicas. Registo dos valores da massa de biomassa antes de serem colocadas na bomba calorimétrica e registo dos valores do PCS obtido em cal/g e kJ*

1ª Réplica		2ª Réplica		Média	Média	
Massa (g)		PCS (cal/g)	Massa (g)	PCS (cal/g)	PCS (kJ/kg)	
<b>M<sub>Cadinhoseco</sub></b>	13,91	4303	<b>M<sub>Cadinhoseco</sub></b>	4295	17969	
<b>M<sub>amostra</sub></b>	0,33		<b>M<sub>amostra</sub></b>			0,28
<b>M<sub>Cadinho+amostra</sub></b>	14,25		<b>M<sub>Cadinho+amostra</sub></b>			14,29

Anexo A.2 – Exemplos de cálculo da caracterização da biomassa

No presente anexo são apresentados os respetivos exemplos de cálculo para a análise elementar e última da amostra da biomassa do ensaio da réplica 1.

Humidade (%)

$$M_{\text{cadinhoseco}} = 48,39 \text{ g}$$

$$M_{\text{amostra}} = 5,17 \text{ g}$$

$$M_{\text{cadinho}} + M_{\text{amostraapós}} = 53,26 \text{ g}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Sólidos Totais} &= \frac{M_{\text{cadinho}} + M_{\text{amostraapós}} - M_{\text{cadinhoseco}}}{M_{\text{amostra}}} \times 100 \% \\ &= \frac{53,2646 - 48,3940}{5,1638} \times 100 = 94,32 \% \end{aligned}$$

$$\% \text{ Humidade} = 100\% - \% \text{ Sólidos Totais} = 100\% - 94,32\% = 5,68\%$$

Teor de Cinzas (%)

$$M_{\text{cadinhoseco}} = 41,07 \text{ g}$$

$$M_{\text{amostra}} = 5,048 \text{ g}$$

$$M_{\text{cadinho}} + M_{\text{amostraapós}} = 41,12 \text{ g}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Teor de Cinzas} &= \frac{M_{\text{cadinho}} + M_{\text{amostraapós}} - M_{\text{cadinhoseco}}}{M_{\text{amostra}}} \times 100 \% \\ &= \frac{41,1198 - 41,0703}{5,0475} \times 100 = 0,98\% \end{aligned}$$

Teor de Carbono Fixo

A quantidade de carbono fixo é determinada pela diferença da soma de todos os restantes parâmetros calculados anteriormente. Portanto o teor de carbono fixo é dado pela diferença para 100 % da soma do teor de cinzas, humidade e do teor de voláteis.

$$\begin{aligned} \% \text{ CF} &= 100\% - (\% \text{ Cinzas} - \% \text{ Humidade} - \% \text{ Matéria Volátil}) \\ &= 100\% - (0,98\% + 5,70\% + 75,6\%) = 17,72\% \end{aligned}$$

Teor de Oxigénio

O teor de oxigénio é calculado pela diferença para 100 % da soma do carbono total, hidrogénio e do azoto.

$$\% \text{ O} = 100\% - (\% \text{ CT} + \% \text{ H} + \% \text{ N}) = 100\% - (49,3\% + 6,5\% + 3,5\%) = 40,7\%$$

### Poder Calorífico Inferior (PCI)

Para determinar o poder calorífico inferior (PCI) é necessário conhecer o valor do poder calorífico superior (PCS), o valor do calor latente de vaporização da água (L), o teor de hidrogénio proveniente da biomassa e a humidade existente na biomassa (M).

$$L = 2,26 \times 10^3 \frac{kJ}{kg}; M = 5,60 \left( \% \frac{m}{m} \right); H = 6,50 \left( \% \frac{m}{m} \right)$$

$$PCI = PCS - L \left( \frac{9H}{100} + \frac{M}{100} \right)$$

$$PCI = 17968 - 2,26 \times 10^3 \times \left( \frac{9 \times 6,50}{100} + \frac{5,60}{100} \right) = 16521 \text{ kJ/kg}$$

### Anexo A.3- Exemplos de cálculo para a determinação do caudal volumétrico de ar

#### **Determinação da massa de combustível para a reação de combustão**

*Dados:* Potência Consumida –  $4,0 \times 10^3 \text{ KW}$ ,  $\eta = 80 \%$ ,  $PCI = 16521 \text{ KJ/Kg}$

$$\eta = \frac{\text{Potência Consumida}}{\dot{m}_{\text{combustível}} \times PCI} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{\text{combustível}} = \frac{4,0 \times 10^3 \frac{\text{KJ}}{\text{s}} \times 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}}{0,80 \times 16521 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}} = 1090 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

#### **Método 1**

#### **Determinação da massa do respetivo elemento por massa de combustível**

Para o hidrogénio:

$$\dot{m}_H = \dot{m}_{\text{combustível}} \times \% \text{ Elementar Hidrogénio} = 1090 \times 0,065 = 70,85 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

Determinação da quantidade molar de hidrogénio:

$$\dot{n}_H = \frac{\dot{m}_H}{MM_C} = \frac{70,85 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{1,01 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 70,15 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

#### **Determinação da quantidade real e estequiométrica de ar usado na reação de combustão**

Dados: m – 44,79 kmol/h C; n – 70,16 kmol/h H; p – 0 kmol/h S; q – 27,73 kmol/h O.  
Os coeficientes encontram-se discriminados na equação 10.

Caudal molar de oxigénio a fornecer

$$n_o = \frac{44,79 \times 2 + \frac{70,16}{2} - 27,73}{2} = 48,47 \text{ kmoles Ar}$$

Caudal mássico de ar presente na reação de combustão

Dados:  $MM_{O_2} = 32,00 \text{ kg/mol}$ ;  $MM_{N_2} = 28,00 \text{ kg/mol}$ .

$$m_{ar,necessário} = 48,47 \times 32,00 + 48,47 \times 3,76 \times 28,00 = 6653,80 \frac{Kg}{h} \text{ de Ar}$$

### Determinação do caudal volumétrico

**Dados:**  $\rho_{ar}(T = 20 \text{ } ^\circ C) = 1,224 \frac{kg}{m^3}$ ; *Massa de Ar* –  $6653,80 \frac{Kg}{h}$  de ar,  
*Excesso de Ar (humidade < 30%)* = 1,8.

$$\rho_{ar} = \frac{m_{ar}}{V_{ar}} \Leftrightarrow \dot{V}_{ar} = \frac{6653,80}{1,224} = 5436,11 \frac{m^3}{h}$$

**Dados:**  $n = 1,80$

$$\dot{V}_{ar} = \frac{6653,80}{1,224} = 5436,11 \frac{m^3}{h} \times 1,8 = 9784,99 \frac{m^3}{h}$$

### **Método 2**

#### **Determinação do caudal de ar**

*Dados:*  $PCI = 3952,42 \text{ kcal/Kg}$ ,  $n$  (para madeira húmida < 30%) = 2

$$V_{ar} \left[ \frac{m^3}{Kg} \right] = \left[ \frac{1,001 \times 3952,42}{1000} + 0,5 \right] \times 2 = 8,91 \frac{m^3}{Kg}$$

$$V_{ar} \left[ \frac{m^3}{h} \right] = 8,905 \frac{Nm^3}{Kg} \times 1090,18 = 9708 \frac{Nm^3}{h}$$

## Anexo A.4- Exemplos de cálculo para o dimensionamento de ventiladores

### Ventilador de Ar Primário

#### Cálculo do caudal volumétrico de ar primário

Dados: Excesso de ar primário = 70%,  $\dot{V}_{ar} = 9708 \frac{m^3}{h}$ , Modelo GR 560/2

$$\dot{V} = \dot{V}_{ar} \times 0,70 = 9708,05 \frac{m^3}{h} \times 0,70 = 6795 \frac{m^3}{h}$$

#### Cálculo das dimensões, comprimento, área, caudal e velocidade dos equipamentos presentes - ventilador primário.

A tabela A.4 apresenta os acessórios e as tubagens presentes no percurso do ar primário desde a saída do ventilador até à entrada da fornalha com respetivas dimensões, área, caudal e velocidade. O ventilador apresenta duas entradas de ar após a sua saída do ventilador.

*Tabela A. 4- Valores obtidos para a dimensão (m), comprimento (m), área (m), caudal (m<sup>3</sup>/h e m<sup>3</sup>/s) e velocidade (m/s) dos diferentes equipamentos presentes no percurso do ar primário.*

<b>Equipamentos</b>	<b>Dimensões (m)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>
Saída Ventilador	0,350x0,250	0,1	0,09	6795	2	22
Coletor	0,280x0,350	1,8	0,1	3397	0,9	10
Curva Coletor	-	-	-			
Válvula Borboleta	-	-	-			
Tubo Ø0,150	0,150	1,23	0,018			53
Curva Ø150, raio longo (R=D)	-	-	-			42
Tubo Retangular	0,150x0,150	0,78	0,023			
Curva Retangular 90°	-	-	-			
Tubo Retangular	0,125x0,430	4,5	0,054	18		
Grelha (96)	0,056x0,036	-	0,0020	70	0,002	10
Grelha (3 secções retangulares)	0,012x0,036	-	0,00014	70	0,0020	46

Cálculo da área de secção reta por onde atravessa o ar primário

**Saída do Ventilador**

$$A = 0,345 \text{ m} \times 0,250 \text{ m} = 0,0875 \text{ m}^2$$

**Coletor**

$$A = 0,280 \text{ m} \times 0,350 \text{ m} = 0,098 \text{ m}^2$$

**Tubo Ø0,150**

$$A = \frac{(0,150)^2}{4} \times \Pi = 0,0176 \text{ m}^2$$

**Tubo Retangular**

$$A = 0,150 \text{ m} \times 0,150 \text{ m} = 0,225 \text{ m}^2$$

**Grelha**

$$A = 0,056 \text{ m} \times 0,0360 \text{ m} = 0,0020 \text{ m}^2$$

**Grelha (3 secções retangulares)**

$$A = 0,012 \text{ m} \times 0,0366 \text{ m} = 0,00014 \text{ m}^2$$

Cálculo do caudal volumétrico de ar primário**Saída do Ventilador**

$$\dot{V} = 6795,63 \frac{m^3}{h} \times \frac{1}{3600} \frac{h}{s} = 1,89 \frac{m^3}{s}$$

**Coletor**

O coletor apresenta duas entradas por onde o caudal de ar primário se vai dividir

$$\dot{V} = \frac{6795,63}{2} \frac{m^3}{h} \times \frac{1}{3600} \frac{h}{s} = 0,94 \frac{m^3}{s}$$

**Grelha**

A grelha é constituída por 96 fendas de iguais dimensões. O caudal de ar primário vai atravessar estas 96 fendas.

$$\dot{V} = \frac{6795,63}{96} \frac{m^3}{h} \times \frac{1}{3600} \frac{h}{s} = 0,019 \frac{m^3}{s}$$

**Grelha (3 secções retangulares)**

Cada uma das 96 fendas apresenta três secções retangulares onde se contabilizam pequenas perdas de carga.

$$\dot{V} = 70,79 \frac{m^3}{h} \times \frac{1}{3600} \frac{h}{s} = 0,019 \frac{m^3}{s}$$

Cálculo da velocidade de escoamento do ar primário**Saída do Ventilador**

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{1,89 \frac{m^3}{s}}{0,0875} = 21,60 \frac{m}{s}$$

**Coletor**

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{0,94 \frac{m^3}{s}}{0,098 m^2} = 9,60 \frac{m}{s}$$

**Tubo Ø0,150**

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{0,94 \frac{m^3}{s}}{0,0176 m^2} = 53,41 \frac{m}{s}$$

**Tubo Retangular**

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{0,94 \frac{m^3}{s}}{0,0225 m^2} = 41,80 \frac{m}{s}$$

**Grelha**

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{0,0197 \frac{m^3}{s}}{0,002016 m^2} = 9,78 \frac{m}{s}$$

**Grelha (3 secções retangulares)**

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{0,00197 \frac{m^3}{s}}{0,00043 m^2} = 45,51 \frac{m}{s}$$

**Cálculo da perda de carga nas tubagens e acessórios - ventilador primário.**

A tabela A.5 apresenta os valores relativos à velocidade, pressão dinâmica (mmca), perda de carga (mmca), fator de perda de carga (K) para os acessórios, fator de perda de carga segundo Darcy (f) para as tubagens, número de Reynolds (Re) e a rugosidade relativa dos tubos utilizados.

*Tabela A. 5- Cálculo da pressão dinâmica (mmca), do coeficiente de perda de carga (K) dos acessórios, do fator de perda de carga segundo Darcy para as tubagens (f), Reynolds (Re) e a rugosidade relativa da tubagem.*

<b>Equipamentos</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>	<b>Pressão Dinâmica (m)</b>	<b>Perda de Carga (mm.c.ar)</b>	<b>Perda de Carga (mm.c.a)</b>	<b>K</b>	<b>f</b>	<b>Re</b>	<b>E/D</b>
<i>Saída Ventilador</i>	22	24	124	0,2	-	0,0152	424196	0,00015
<i>Coletor</i>	10	5	411	0,5		0,0150	452476	0,00014
<i>Curva Coletor</i>			7099	9	1,5	-	-	-
<i>Válvula Borboleta</i>			11879	14	2,51	-	-	-
<i>Tubo Ø0,150</i>	53	146	19334	23	-	0,0162	540103	0,00030
<i>Curva Ø150, raio longo (R=D)</i>			58218	70	0,4	-	-	-
<i>Tubo Retangular</i>	42	90	7703	9	-	0,0165	424196	0,0003
<i>Curva Retangular 90°</i>			134668	162	1,5	-	-	-
<i>Tubo Retangular</i>	18	16	6213	8	-	0,017	229295	0,00023
<i>Grelha (96)</i>	10	5	2427	3	0,5	-	36822	0,00080
<i>Grelha (3 secções retangulares)</i>	46	106	25369	30	0,24		55233	0,00250

- Tubagens

Cálculo do número de Reynolds das tubagens

**Exemplo de cálculo para o tubo Ø 0,150**

Dados:  $\rho_{ar} (T = 20^{\circ}C) = 1,2 \frac{Kg}{m^3}$ ,  $v = 53,41 \frac{m}{s}$ ,  $d = 0,150 m$ ,  $\mu_{ar}(T = 20^{\circ}C) = 1,78 \times 10^{-5} \frac{Kg}{m^2s}$ ;

$$Re = \frac{\rho_{ar} \times v \times d}{\mu_{ar}} = \frac{1,2 \frac{Kg}{m^3} \times 53,41 \frac{m}{s} \times 0,150}{1,78 \times 10^{-5} \frac{Kg}{m^2s}} = 5,4 \times 10^5$$

**Exemplo de cálculo para o tubo retangular 0,125 x 0,430 m**

Dados:  $\rho_{ar} (T = 20^{\circ}C) = 1,2 \frac{Kg}{m^3}$ ,  $v = 17,60 \frac{m}{s}$ ,  $deq = 0,193 m$ ,  $\mu_{ar}(T = 20^{\circ}C) = 1,78 \times 10^{-5} \frac{Kg}{m^2s}$ ;

$$Re = \frac{\rho_{ar} \times v \times d}{\mu_{ar}} = \frac{1,2 \frac{Kg}{m^3} \times 17,60 \frac{m}{s} \times 0,193 m}{1,78 \times 10^{-5} \frac{Kg}{m^2s}} = 2,29 \times 10^5$$

Cálculo do diâmetro equivalente para tubos retangulares

$$deq = \frac{4 \times 0,125 \times 0,430}{2 \times 0,125 + 2 \times 0,430} = 0,193 m$$

Cálculo da rugosidade relativa E/D

**Exemplo de cálculo para o tubo Ø 0,150**

Dados:  $\varepsilon = 4,5 \times 10^{-5} m$  para aço comercial,  $D = 0,150 m$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{4,5 \times 10^{-5}}{0,150} = 0,0003$$

**Exemplo de cálculo para o tubo retangular Ø 0,125 m**

Dados:  $\varepsilon = 4,5 \times 10^{-5} m$  para aço comercial,  $Deq = 0,193 m$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{4,5 \times 10^{-5}}{0,193} = 0,00023$$

Cálculo do fator de atrito f para as tubagens pela equação generalizada

**Exemplo de cálculo para o tubo Ø 0,150**

Dados:  $\varepsilon = 4,5 \times 10^{-5}$ ,  $D = 0,150 m$ ,  $Re = 5,40 \times 10^5$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( 0,27 \times \frac{k}{D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( 0,27 \times \frac{4,5 \times 10^{-5}}{0,150} + \frac{2,51}{5,40 \times 10^5 \sqrt{f}} \right) \Leftrightarrow f = 0,0162$$

### Cálculo da pressão dinâmica

#### **Exemplo de cálculo para o tubo Ø 0,150**

$$\text{Pressão Dinâmica} = \frac{v_1^2}{2g} = \frac{(53,41 \frac{m}{s})^2}{2 \times 9,8 \frac{m}{s^2}} = 145,6 \text{ m. c. ar}$$

### Cálculo da perda de carga em m.c.ar

#### **Exemplo de cálculo para o tubo Ø 0,150**

Dados:  $Le = 1,23 \text{ m}$ ,  $D = 0,150 \text{ m}$ ,  $f = 0,0162$

$$\Delta P = f \times \frac{Le}{D} \times \frac{v^2}{2g} = 0,0162 \times \frac{1,23}{0,150} \times \frac{53,41^2}{2 \times 9,8} = 19,33 \text{ m. c. ar}$$

- Acessórios

#### **Saída do Coletor**

Dados:  $K = 1,50$ ,  $v = 9,63 \frac{m}{s}$

Na figura A.1 encontra-se representado o coeficiente de perda de carga, K, para a saída do coletor.

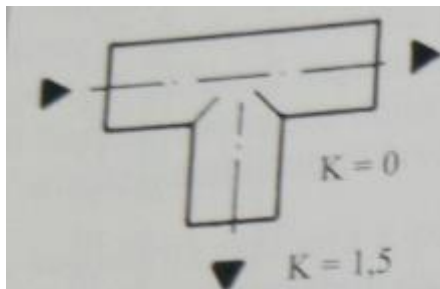


Figura A. 1- Coeficiente de perda de carga,  $K=1,50$  utilizado para a saída do coletor.

$$\Delta P = K \times \frac{v^2}{2g} = 1,5 \times \frac{(9,63)^2}{2 \times 9,8} = 8,52 \text{ m. c. ar}$$

#### **Válvula Borboleta**

Dados:  $K = 2,51$   $\alpha = 25^\circ$ ,  $v = 9,63 \frac{m}{s}$

A tabela A.6 representa os diferentes valores do ângulo de abertura ( $\alpha$ ) e respectivos coeficientes de perda de carga associado ao ângulo de abertura respectivo ( $k \alpha$ ).

*Tabela A. 6- Valores relativos do ângulo de abertura e respectivo coeficiente de perda de carga associado ao ângulo de abertura da válvula borboleta.*

$\alpha^\circ$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
K	0,15	0,24	0,52	0,90	1,54	2,51	3,91	6,22	10,8	18,7	32,6

$$\Delta P = K \times \frac{v^2}{2g} = 2,51 \times \frac{9,63^2}{2 \times 9,8} = 11,87 \text{ m. c. ar}$$

#### **Curva Ø0,150 de curva longa**

Dados:  $K$  (curva longa) = 0,40 (Figura 3.12),  $v = 29,90 \frac{m}{s}$

$$\Delta P = K \times \frac{V^2}{2g} = 0,40 \times \frac{(53,41)^2}{2 \times 9,8} = 18,25 \text{ m. c. ar}$$

**Curva retangular 90°**

Dados:  $K$  (convergente) = 1,50 (Tabela 3.7),  $v = 41,95 \frac{m}{s}$

$$\Delta P = K \times \frac{V^2}{2g} = 1,50 \times \frac{(41,95)^2}{2 \times 9,8} = 134,68 \text{ m. c. ar}$$

**Grelha**

Dados:  $K = 0,50$ ,  $v = 9,73 \frac{m}{s}$

$$\Delta P = K \times \frac{V^2}{2g} = 0,50 \times \frac{(9,73)^2}{2 \times 9,8} = 2,42 \text{ m. c. ar}$$

**Grelha (3 secções retangulares)**

Dados:  $K = 0,24$ ,  $v = 45,51 \frac{m}{s}$

$$\Delta P = K \times \frac{V^2}{2g} = 0,24 \times \frac{(45,51)^2}{2 \times 9,8} = 25,36 \text{ m. c. ar}$$

**Perda de carga Total, mmH<sub>2</sub>O**

$$\begin{aligned} \Delta P_{total} &= \sum \Delta P_{tubagens} + \sum \Delta P_{acessórios} + P_{Dinâmica tubo 0,15 m} = \\ &= 420,67 \text{ m. c. ar} \times \frac{1000 \text{ mm. c. ar}}{\text{m. c. ar}} \times 1,2 \frac{Kg}{m^3} \times \frac{1 m^3}{1000 dm^3} = 504,78 \text{ mm. c. a} \end{aligned}$$

## Ventilador de Ar Secundário

### Cálculo do caudal volumétrico de ar secundário

Dados: Excesso de ar primário = 40%,  $\dot{V}_{ar} = 9708 \frac{m^3}{h}$ , Modelo GR 500/2

$$\dot{V} = \dot{V}_{ar} \times 0,40 = 9708 \frac{m^3}{h} \times 0,40 = 3883 \frac{m^3}{h}$$

### Cálculo das dimensões, comprimento, área, caudal e velocidade dos equipamentos presentes -ventilador secundário.

A tabela A.7 apresenta os acessórios e as tubagens presentes no percurso do ar secundário desde a saída do ventilador até à entrada da fornalha com respetivas dimensões, área, caudal e velocidade. O ventilador apresenta quatro entradas de ar.

*Tabela A. 7- Valores obtidos para a dimensão (m), comprimento (m), área (m<sup>2</sup>), caudal (m<sup>3</sup>/h e m<sup>3</sup>/s) e velocidade (m/s) dos diferentes equipamentos presentes no percurso do ar secundário.*

<b>Equipamentos</b>	<b>Dimensões (m)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>
Saída Ventilador	0,350x0,250	0,10	0,09	3883	1,1	12
Coletor	0,280x0,350	1,80	0,1	970	0,3	3
Curva Coletor	-	-	-			
Válvula Borboleta	-	-	-			
Tubo Retangular	0,130	1,06	0,02			16
Curva Ø130, raio longo (R=D)	-	-	-			
Tubo Retangular	0,160x0,160	1,23	0,03			
Curva Retangular 90°	-	-	-			
Tubo Retangular	0,084x0,430	5,65	0,04	8		
T entrada	-	-	-			
Tubos Insuflação (24)	0,053	1	0,0022	161	0,05	20
Curva 90°	-	-	-			
Tubos Insuflação (24)	0,052	1	0,0021			21

Cálculo da área de secção reta por onde atravessa o ar secundário**Tubo Retangular**

$$A = 0,130 \text{ m} \times 0,130 \text{ m} = 0,0169 \text{ m}^2$$

**Tubos de insuflação  $\emptyset$  0,053 m**

$$1. A = \frac{0,053^2}{4} \times \pi = 0,0022 \text{ m}^2$$

**Tubos de insuflação  $\emptyset$  0,052 m**

$$A = \frac{0,052^2}{4} \times \pi = 0,0021 \text{ m}^2$$

### Cálculo do caudal volumétrico de ar secundário

#### **Saída do Ventilador**

$$\dot{V} = 3883,22 \frac{m^3}{h} \times \frac{1}{3600} \frac{h}{s} = 1,08 \frac{m^3}{s}$$

#### **Coletor**

O coletor apresenta quatro entradas por onde o caudal de ar secundário se vai dividir

$$\dot{V} = \frac{3883,22 m^3}{4 h} \times \frac{1}{3600} \frac{h}{s} = 0,27 \frac{m^3}{s}$$

#### **Tubos internos de insuflação**

Na entrada da fornalha, para o ar secundário, este atravessa uma secção circular onde existem 24 tubos e o caudal de ar secundário vai atravessar estes 24 tubos internos.

$$\dot{V} = \frac{3883,22 m^3}{24 h} \times \frac{1}{3600} \frac{h}{s} = 0,045 \frac{m^3}{s}$$

### Cálculo da velocidade de escoamento do ar primário

#### **Saída do Ventilador**

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{1,08 \frac{m^3}{s}}{0,0875} = 12,34 \frac{m}{s}$$

#### **Coletor**

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{0,27 \frac{m^3}{s}}{0,098 m^2} = 2,80 \frac{m}{s}$$

#### **Tubo Retangular (0,130 x 0,130) m**

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{0,27 \frac{m^3}{s}}{0,0169 m^2} = 15,97 \frac{m}{s}$$

#### **Tubo Retangular (0,160x0,160) m**

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{0,27 \frac{m^3}{s}}{0,0256 m^2} = 10,55 \frac{m}{s}$$

**Tubo Retangular (0,084x0,430) m**

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{0,27 \frac{m^3}{s}}{0,0361 m^2} = 7,48 \frac{m}{s}$$

**Tubo Ø 0,053 m**

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{0,045 \frac{m^3}{s}}{0,0022 m^2} = 20,45 \frac{m}{s}$$

**Tubos Ø 0,052 m**

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{0,045 \frac{m^3}{s}}{0,0021 m^2} = 21,40 \frac{m}{s}$$

### Cálculo da perda de carga nas tubagens e acessórios - ventilador secundário.

A tabela A.8 apresenta os valores relativos à velocidade, pressão dinâmica (mmca), perda de carga (mmca), fator de perda de carga (K) para os acessórios, coeficiente de perda de carga segundo Darcy (f) para as tubagens, número de Reynolds (Re) e a rugosidade relativa dos tubos utilizados.

Tabela A. 8- Cálculo da pressão dinâmica (mmca), do coeficiente de perda de carga (K) dos acessórios, do fator de perda de carga segundo Darcy para as tubagens (f), Reynolds (Re) e a rugosidade relativa da tubagem.

<b>Equipamentos</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>	<b>Pressão Dinâmica (m.c.ar)</b>	<b>Perda de Carga (mm.c.ar)</b>	<b>Perda de Carga (mm.c.a)</b>	<b>K</b>	<b>f</b>	<b>Re</b>	<b>E/D</b>
Saída Ventilador	12	8	47	0,06	-	0,0178	246553	0,00015
Coletor			51	0,06	-	0,023	58703	0,00014
Curva Coletor	3	0,4	570	0,7	1,50	-	-	-
Válvula Borboleta			960	1	2,51	-	-	-
Tubo Retangular	16	13	1590	2	-	0,016	142242	0,00034
Curva Ø130, raio longo			5190	6	0,40	-	-	-
Tubo Retangular	11	6	690	0,8	-	0,016	115572	0,00028
Curva Retangular 90°			83220	100	1,50	-	-	-
Tubo Retangular	8	3	2510	3	-	0,022	71951	0,00032
T entrada			3690	4	1,30	-	-	-
Tubo Insuflação	20	21	7590	9	-	0,019	74038,2	0,00084
Curva 90°	21	23	20560	25	0,90	-	-	-
Tubos Insuflação			8780	11	-	0,02	75461	0,00086

Cálculo da perda de carga• TubagensCálculo do número de Reynolds das tubagens**Exemplo de cálculo para o tubo Ø 0,160**

Dados:  $\rho_{ar} (T = 20^{\circ}C) = 1,2 \frac{Kg}{m^3}$ ,  $v = 10,53 \frac{m}{s}$ ,  $d = 0,160 m$ ,  $\mu_{ar}(T = 20^{\circ}C) = 1,78 \times 10^{-5} \frac{Kg}{m^2s}$ ;

$$Re = \frac{\rho_{ar} \times v \times d}{\mu_{ar}} = \frac{1,2 \frac{Kg}{m^3} \times 10,53 \frac{m}{s} \times 0,160}{1,78 \times 10^{-5} \frac{Kg}{m^2s}} = 1,15 \times 10^5$$

Cálculo da rugosidade relativa E/D**Exemplo de cálculo para o tubo Ø 0,160**

Dados:  $\varepsilon = 4,5 \times 10^{-5} m$  para aço comercial,  $D = 0,160 m$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{4,5 \times 10^{-5}}{0,160} = 0,00028$$

Cálculo do fator de atrito f para as tubagens pela equação generalizada**Exemplo de cálculo para o tubo Ø 0,160**

Dados:  $\varepsilon = 4,5 \times 10^{-5}$ ,  $D = 0,160 m$ ,  $Re = 1,15 \times 10^5$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( 0,27 \times \frac{k}{D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( 0,27 \times \frac{4,5 \times 10^{-5}}{0,160} + \frac{2,51}{1,15 \times 10^5 \sqrt{f}} \right) \Leftrightarrow f = 0,016$$

Cálculo da perda de pressão cinemática**Exemplo de cálculo para o tubo Ø 0,160**

$$h_p = \frac{v_1^2}{2g} = \frac{(10,53 \frac{m}{s})^2}{2 \times 9,8 \frac{m}{s^2}} = 5,66 m. c. ar$$

Cálculo da perda de carga em m.c.ar**Exemplo de cálculo para o tubo Ø 0,160**

Dados:  $L_e = 1,23 m$ ,  $D = 0,160 m$ ,  $f = 0,016$

$$\Delta P = f \times \frac{Le}{D} \times \frac{V^2}{2g} = 0,016 \times \frac{1,23}{0,160} \times \frac{10,53^2}{2 \times 9,8} = 0,69 \text{ m. c. ar}$$

- Acessórios

### T entrada

Dados:  $K$  (passagem lateral) = 1,30 (Tabela 3.7),  $v = 7,46 \frac{m}{s}$

$$\Delta P = K \times \frac{V^2}{2g} = 1,3 \times \frac{(7,46)^2}{2 \times 9,8} = 3,69 \text{ m. c. ar}$$

### Curva Retangular 90 °

Dados:  $K$  (cotovelo raio curto) = 0,90 (Tabela 3.7),  $v = 21,16 \frac{m}{s}$

$$\Delta P = K \times \frac{V^2}{2g} = 0,9 \times \frac{(21,16)^2}{2 \times 9,8} = 20,56 \text{ m. c. ar}$$

### **Perda de carga Total, mmH<sub>2</sub>O**

$$\begin{aligned} \Delta P_{total} &= \sum \Delta P_{tubagens} + \sum \Delta P_{acessórios} + P_{Dinâmica tubo 0,052 m} = \\ &= 770,82 \text{ m. c. ar} \times \frac{1000 \text{ mm. c. ar}}{\text{m. c. ar}} \times 1,2 \frac{Kg}{m^3} \times \frac{1 m^3}{1000 dm^3} = 190,05 \text{ mm. c. a} \end{aligned}$$

## Anexo B.1 – Norma Teor de Humidade

Norma NREL/TP-510-42621 – Determinação do teor de humidade (Pág.3 da respetiva norma).

### **10.1 Convection oven method (use either 10.1 or 10.2)**

- 10.1.1 Pre-dry aluminum weighing dishes by placing them in a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  drying oven for a minimum of four hours. Cool the dishes in a desiccator. Using gloves or tweezers to handle the dishes, weigh a pre-dried dish to the nearest 0.1 mg. (It may be helpful to place a dry glass fiber pad in the bottom of each pan for liquor samples. Include the weight of the pad with the weight of the pan.) Record this weight.
- 10.1.2 Thoroughly mix the sample and then weigh out an appropriate amount to the nearest 0.1 mg, into the weighing dish. Liquor samples should be passed through a  $0.2 \mu\text{m}$  filter prior to analysis. Record the weight of the sample plus weighing dish. Analyze each sample in duplicate, at minimum.
- 10.1.3 Place the sample into a convection oven at  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  for a minimum of four hours. Remove the sample from the oven and allow it to cool to room temperature in a desiccator. Weigh the dish containing the oven-dried sample to the nearest 0.1mg and record this weight.
- 10.1.4 Place the sample back into a convection oven at  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  and dry to constant weight. Constant weight is defined as  $\pm 0.1\%$  change in the weight percent solids upon one hour of re-heating the sample. Overnight drying is usually required for very wet or liquid samples.

### **10.2 Automatic infrared moisture analyzer method (use either 10.1 or 10.2)**

- 10.2.1 Program the automated moisture analyzer for a standby temperature of  $70^\circ\text{C}$ , an analysis temperature of  $105^\circ\text{C}$ , and an end point of less than 0.05% solids change in one minute.
- 10.2.2 Turn on the infrared heating elements and allow them to warm up for approximately 20 minutes. Run the instruments once with an unimportant, disposable sample to bring the heating elements to temperature, if necessary.
- 10.2.3 Pre-dry aluminum weighing dishes by placing them in a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  drying oven for a minimum of four hours or running them through the moisture analyzer once without a sample. If pans are dried in the oven, cool them in a desiccator. Using gloves or tweezers, place an aluminum weighing dish on the balance pan, and tare the balance if necessary.
- 10.2.4 Quickly transfer desired amount of the thoroughly mixed sample to the weighing dish. Spread the sample evenly over the surface of the weighing dish. Analyze each sample induplicate, at minimum.
- 10.2.5 As soon as the instrument balance stabilizes, shut the hood of the instrument and proceed with the analysis, following the instructions in the instrument operation manual.
- 10.2.6 Once the sample has been dried to constant weight, as determined by the programmed analysis parameters, the analysis will automatically be terminated. Record the percent solids or percent moisture.

## Anexo B.2 – Norma Teor de Cinzas

NREL/TP-510-42622 – Determinação do teor de cinzas (Pág.2 e 3 da respetiva norma).

### 10. Procedure

- 10.1 Using a porcelain marker, mark an appropriate number of crucibles with identifiers, and place them in the muffle furnace at  $575 \pm 25$  °C for a minimum of four hours. (Marking crucibles with a porcelain marker will permanently mark them, so a generic identifier is recommended.) Remove the crucibles from the furnace directly into a desiccator. If using a furnace set to  $575 \pm 25$  °C, cool for a specific period of time, one hour is recommended. Record the cool time. Weigh the crucibles to the nearest 0.1 mg and record this weight.
- 10.2 Place the sample back into the muffle furnace at  $575 \pm 25$ °C and dry to constant weight. Constant weight is defined as less than  $\pm 0.3$  mg change in the weight upon one hour of re-heating the crucible.
- 10.3 Weigh 0.5 to 2.0 g, to the nearest 0.1 mg, of a test specimen into the tared crucible. Record the sample weight. If the sample being analyzed is a 105°C dried test specimen, the sample should be stored in a desiccator until use. If air dry samples are used, LAP “Determination of Total Solids in Biomass” should be performed at the same time, to accurately measure the percent solids for correction. Each sample should be analyzed in duplicate, at minimum.
- 10.4 Ash the samples. *Use step 10.4.1 if using a muffle furnace set to  $575 \pm 25$  °C. Use step 10.4.2 if using a muffle furnace with a ramping program.*
  - 10.4.1 Ash the samples using a muffle furnace set to  $575 \pm 25$  °C.
    - 10.4.1.1 Using an ashing burner and clay triangle with stand, place the crucible over the flame until smoke appears. Immediately ignite the smoke and allow the sample to burn until no more smoke or flame appears. Allow the crucible to cool before placing it in the muffle furnace. Alternately, a furnace with a temperature ramping function may be used to avoid pre-ignition.
    - 10.4.1.2 Place the crucibles in the muffle furnace at  $575 \pm 25$  °C for  $24 \pm 6$  hours. When handling the crucible, protect the sample from drafts to avoid mechanical loss of sample.
    - 10.4.1.3 Carefully remove the crucible from the furnace directly into a desiccator and cool for a specific amount of time, equal to the initial cool time of the crucibles. Weigh the crucibles and ash to the nearest 0.1 mg and record the weight.
    - 10.4.1.4 Place the sample back into the muffle furnace at  $575 \pm 25$  °C and ash to constant weight. Constant weight is defined as less than  $\pm 0.3$  mg change in the weight upon one hour of re-heating the crucible. When allowing samples to cool in a desiccator, it is necessary to maintain the initial cool time.
  - 10.4.2 Ash the samples using a muffle furnace equipped with a ramping program.

Furnace Temperature Ramp Program: Ramp from room temperature to 105 °C  
Hold at 105°C for 12 minutes  
Ramp to 250 °C at 10°C / minute  
Hold at 250 °C for 30 minutes  
Ramp to 575 °C at 20 °C / minute  
Hold at 575 °C for 180 minutes  
Allow temperature to drop to 105 °C  
Hold at 105 °C until samples are removed

    - 10.4.2.1 Place the crucibles in the muffle furnace and begin the ramping program. When handling the crucible, protect the sample from drafts to avoid mechanical loss of sample.
    - 10.4.2.2 Carefully remove the crucible from the furnace directly into a desiccator and cool. Weigh the crucibles and ash to the nearest 0.1 mg and record the weight.
    - 10.4.2.3 Place the sample back into the muffle furnace at  $575 \pm 25$ °C and ash to constant weight. Constant weight is defined as less than  $\pm 0.3$  mg change in the weight upon one hour of re-heating the crucible

## Anexo B.3 – Norma Determinação Poder Calorífico

ASTM D5865 – Procedimento para determinação do poder calorífico – Página 508 e 509 da respetiva norma.

### 10. Determination of the Heat Capacity of the Calorimeter

10.1 *Sample*—Weigh 0.8 to 1.2 g of benzoic acid into a sample holder. Record sample weight to the nearest 0.0001 g.

#### 10.2 Preparation of Bomb:

10.2.1 Rinse the bomb with water to wet internal seals and surface areas of the bomb or precondition the calorimeter according to the manufacturer's instructions. Add 1.0 mL of water to the bomb before assembly.

10.2.2 Connect a measured fuse in accordance with manufacturer's guidelines.

10.2.3 Assemble the bomb. Admit oxygen to the bomb to a consistent pressure of between 2 and 3 MPa (20 and 30 atm). The same pressure is used for each heat capacity run. Control oxygen flow to the bomb so as not to blow material from the sample holder. If the pressure exceeds the specified pressure, detach the filling connection and exhaust the bomb. Discard the sample.

#### 10.3 Preparation of Calorimeter:

10.3.1 Fill the calorimeter vessel with water at a temperature not more than 2°C below room temperature and place the assembled bomb in the calorimeter. Check that no oxygen bubbles are leaking from the bomb. If there is evidence of leakage, remove and exhaust the bomb. Discard the sample.

10.3.2 The mass of water used for each test run shall be  $M \pm 0.5$  g where  $M$  is a fixed mass of water. Devices used to supply the required mass of water on a volumetric basis shall be adjusted when necessary to compensate for change in the density of water with temperature.

10.3.3 With the calorimeter vessel positioned in the jacket start the stirrers.

#### 10.4 Temperature Observations Automated Calorimeters:

10.4.1 *Stabilization*—The calorimeter vessel's temperature shall remain stable over a period of 30 s before firing. The stability shall be  $\pm 0.001^\circ\text{C}$  for an adiabatic calorimeters and  $\pm 0.001^\circ\text{C/s}$  or less for an isoperibol calorimeter.

10.4.2 *Extrapolation Method*—Fire the charge, record the temperature rise. The test can be terminated when the observed thermal curve matches a thermal curve which allows extrapolation to a final temperature with a maximum uncertainty of  $\pm 0.002^\circ\text{C}$ .

10.4.3 *Full Development Method*—Fire the charge and record the temperature rise until the temperature has stabilized for a period of 30 s in accordance with the stability requirements specified in 10.4.1.

#### 10.5 Temperature Observations Manual Calorimeters:

10.5.1 When using ASTM Thermometers 56C, estimate all

readings to the nearest  $0.002^\circ\text{C}$ . When using ASTM Thermometers 115C, 116C, or 117C, estimate readings to  $0.001^\circ\text{C}$  and 25- $\Omega$  resistance thermometer readings to the nearest  $0.0001^\circ\text{C}$ . Tap or vibrate mercury thermometers just before reading to avoid errors caused by mercury sticking to the walls of the capillary.

10.5.2 Allow 5 min for the temperature of the calorimeter vessel to stabilize. Adjust the jacket temperature to match the calorimeter vessel temperature within  $0.01^\circ\text{C}$  and maintain for 3 min.

10.5.3 Fire the charge. Record the time as  $a$  and the temperature as  $t_a$ .

10.5.4 For adiabatic calorimeters adjust the jacket temperature to match that of the calorimeter vessel temperature during the period of the rise. Keep the two temperatures as equal as possible during the period of rapid rise. Adjust to within  $0.01^\circ\text{C}$  when approaching the final stabilization temperature. Record subsequent readings at intervals no greater than 1 min until three successive readings do not differ by more than  $\pm 0.001^\circ\text{C}$ . Record the first reading after the rate of change has stabilized as the final temperature  $t_f$  and the time of this reading as  $c$ . For isoperibol calorimeters, when approaching the final stabilization temperature, record readings until three successive readings do not differ by more than  $0.001^\circ\text{C}$  per min. Record the first reading after the rate of change has stabilized as the final temperature as  $t_f$  and the time of this reading as  $c$ .

10.5.5 Open the calorimeter and remove the bomb. Release the pressure at a uniform rate such that the operation will not be less than 1 min. Open the bomb and examine the bomb interior. Discard the test if unburned sample or sooty deposits are found.