



ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA E GESTÃO  
INSTITUTO POLITÉCNICO DA GUARDA

# COMBUSTÃO DE BIOMASSA E TRATAMENTO DE EFLUENTES GASOSOS

---

PROJECTO FINAL DO CURSO DE  
ENGENHARIA DO AMBIENTE

Discente n.º 1008890	<b>Marlene Patrícia Videira Monteiro</b>		
Data	<b>Dezembro de 2010</b>	Refª	



**Instituto Politécnico da Guarda**

**Escola Superior de Tecnologia e Gestão**

Ano Lectivo 2009 / 2010

# Combustão de Biomassa e Tratamento de Efluentes Gasosos

Trabalho realizado no âmbito da disciplina de Projecto Ambiental do curso de Engenharia do Ambiente, 3º Ano, 2º semestre.

Professores Orientadores:

José Almeida

e

Jorge Gregório

**Guarda**  
**Dezembro de 2010**

## Identificação

- **Nome:** Marlene Patrícia Videira Monteiro
- **Nacionalidade:** Portuguesa
- **C.C.:** 12601992
- **Morada:** Montes do Jarmelo – Guarda
- **Telefone:** 271 963 619
- **Email:** [marlene23@live.com.pt](mailto:marlene23@live.com.pt)

## **Agradecimentos**

Este trabalho representa muitas horas de estudo, reflexão e dedicação, nas diversas etapas que o constituem. É o final de mais uma etapa da minha vida, final da vida académica que levo para sempre gravada no meu coração e na minha memória e que com certeza abrirá caminhos para o meu futuro.

Todo este percurso não seria possível sem a ajuda de várias pessoas.

Quero agradecer em primeiro lugar aos meus pais, que muitos sacrifícios fizeram para eu chegar até aqui e que acreditaram sempre nas minhas capacidades, nunca desistiram nem me deixaram desistir nos momentos mais difíceis e estiveram sempre ao meu lado quando mais precisei, com todo o seu amor. Quero também agradecer à minha irmã pela paciência, compreensão, apoio e força que me deu.

Em segundo lugar agradeço aos meus orientadores, Professor Jorge Gregório e Professor José Almeida, pela sua disponibilidade, compreensão, paciência, simpatia, e apoio que me prestaram, para superar os diferentes obstáculos ao longo do trabalho.

Agradeço também ao Engenheiro Nuno Sanches, da Central Termoelétrica de Biomassa de Belmonte, pela disponibilidade e simpatia com que me recebeu.

Ao meu namorado que me apoiou sempre, e acreditou que eu conseguia ultrapassar todos os obstáculos. A todos os familiares, amigos (pelos momentos inesquecíveis desta vida académica) e professores que directa ou indirectamente contribuíram para a realização deste trabalho e a todos aqueles que partilharam comigo os seus conhecimentos e me apoiaram.

A todos, o meu Muito Obrigada

## **Resumo**

O presente trabalho realiza-se no âmbito da unidade curricular de projecto ambiental, do 3º ano do curso de licenciatura em Engenharia do Ambiente.

O trabalho encontra-se dividido em capítulos e em cada um deles serão desenvolvidos os diferentes temas: biomassa, combustão de biomassa e equipamentos de queima, tratamento de efluentes gasosos e estudo de caso prático aplicado a uma central de biomassa, com dimensionamento do sistema de despoeiramento, constituído por um multiciclone e um filtro de mangas.

**Palavras-chave:** Biomassa, combustão de biomassa, caldeiras, tratamento de efluentes gasosos, ciclone, multiciclone, filtro de mangas, caso de estudo, CTBB.

## **Abstract**

This work is accomplished within the course of the environmental project, the 3rd year of degree course in Environmental Engineering.

The work is divided into chapters and each one will develop the different themes: biomass, biomass combustion and burning equipment, waste gas treatment and practical case study applied to a biomass plant, with sizing dedusting system, consisting of a multi-cyclone and a bag filter.

**Key words:** Biomass, biomass combustion, boilers, wastewater treatment gas, cyclone, multi-cyclone, bag filter, case study, CTBB.

## Nomenclatura

D ou Dc – Diâmetro do corpo cilíndrico do ciclone

a - Altura da secção rectangular da entrada de gás

b – Largura da secção rectangular da entrada de gás

h – Altura do corpo cilíndrico

De – Diâmetro da conduta de saída da gás limpo

S – Altura da conduta de saída de gás limpo

H – Altura total do ciclone

B – Diâmetro da conduta da saída de partículas

K<sub>a</sub> - Parâmetro adimensional relativo à altura da conduta de entrada

K<sub>b</sub> – Parâmetro adimensional relativo à largura da conduta de entrada

K<sub>s</sub> – Parâmetro adimensional relativo à altura da conduta de saída

K<sub>B</sub> – Parâmetro adimensional relativo ao diâmetro do descarregador de partículas

K<sub>h</sub> - Parâmetro adimensional relativo à altura do corpo cilíndrico do ciclone

K<sub>H</sub> - Parâmetro adimensional relativo à altura total do ciclone

K<sub>De</sub> - Parâmetro adimensional relativo ao diâmetro da conduta de saída

K<sub>L</sub>– Parâmetro adimensional relativo ao comprimento natural do ciclone

K – Parâmetro de eficiência do ciclone

K/N<sub>H</sub> – Parâmetro de desempenho

u<sub>0</sub> – Velocidade do gás à entrada do ciclone

Δp – Perda de carga através do ciclone

G<sub>v</sub> – Caudal volumétrico de efluentes gasosos através do ciclone

A – Área da secção de entrada

η(dp) – Eficiência fraccionária de remoção de partículas

N<sub>H</sub> – Parâmetro de perda de carga

ρ<sub>p</sub> - Massa volúmica das partículas

C<sub>0</sub> – Concentração inicial das partículas

G<sub>0</sub> – Distribuição de tamanhos de entrada das partículas

ρ<sub>G</sub> – Massa volúmica do gás

μ<sub>G</sub> – Viscosidade dinâmica do gás

P - Pressão

$d_{pc}$  ou  $d_{p_{50}}$  – Diâmetro de corte

$d_{pi}$  ou  $d_p$  – Diâmetro da partícula

$N_e$  – Número de rotações que a trajectória do gás descreve no ciclone

n - Número de mangas

H – Altura de cada manga

S – Área de filtração

D – Diâmetro das mangas

L – Comprimento

$n\pi DH$  – Área total da superfície de colecta

$u_0$  – Velocidade superficial de passagem do gás pelo filtro

$G_v$  – Caudal volúmico do gás

$\Delta p_f$  – Perda de carga através do bolo de filtração

CTBB – Central Termoeléctrica de Biomassa em Belmonte

As unidades de medida indicadas ao longo deste trabalho encontram-se no sistema SI (Sistema Internacional de Unidades), de acordo com o Decreto-lei n.º 128/2010 de 3 de Dezembro. As excepções encontram-se devidamente referenciadas ao longo do texto.

## Índice Geral

Capítulo I.....	16
1 Introdução.....	17
1.1 Estrutura do trabalho .....	17
1.2 Objectivos.....	18
Capítulo II.....	19
2 Biomassa.....	20
2.1 Potencial da Biomassa .....	22
2.2 Tipos de Biomassa .....	24
2.3 Fontes e Produtos de Biomassa.....	25
2.3.1 Fontes de Biomassa Sólida.....	27
2.3.2 Fontes de biocombustíveis líquidos .....	30
2.3.3 Fontes de biocombustíveis gasosos.....	31
2.3.4 Produtos de Biomassa Sólida.....	31
2.3.5 Produtos biocombustíveis líquidos .....	38
2.3.6 Produtos biocombustíveis gasosos.....	38
Capítulo III.....	40
3 Combustão e equipamentos de queima.....	41
3.1 Combustão da Biomassa.....	41
3.1.1 Pirólise.....	41
3.1.2 Gaseificação .....	43
3.2 Equipamentos de combustão de Biomassa .....	47
3.2.1 Equipamentos domésticos.....	47
3.2.2 Equipamentos industriais .....	48
Capítulo IV.....	57
4 Tratamento de Efluentes Gasosos.....	58
4.1 Poluentes Atmosféricos.....	58

4.2	Controlo da poluição atmosférica .....	59
4.3	Seleccção dos Equipamentos de controlo da poluição do ar.....	60
4.4	Equipamentos de tratamento de efluentes gasosos .....	61
4.4.1	Precipitadores Electrostáticos .....	62
4.4.2	Ciclones e multiciclones .....	64
4.4.3	Filtros de Mangas.....	74
Capítulo V	.....	86
5	Caso de Estudo .....	87
5.1	Dimensionamento do multiciclone .....	91
5.2	Dimensionamento do filtro de mangas .....	98
Capítulo VI	.....	100
6	Conclusão .....	101
Referências bibliográficas	.....	102
Anexo	.....	113

## Índice de imagens

Imagem 1 – Ciclo da Biomassa [1] .....	21
Imagem 2 – Tipos de Biomassa [2].....	22
Imagem 3 – Potencial térmico de biomassa em média na Europa [3].....	23
Imagem 4 – Biomassa variada [4].....	25
Imagem 5 – Resíduos Orgânicos [5] .....	25
Imagem 6 – Colheita de girassol para energia [6] .....	26
Imagem 7 – Corte de árvores [7] .....	26
Imagem 8 – Colheita de Madeira mecanizada [8] .....	27
Imagem 9 – Madeira industrial e os seus subprodutos [9] .....	28
Imagem 10 – Casca (subproduto do processamento da madeira) [10].....	28
Imagem 11 – Colheita mecanizada de palha com fardo prensado [11] .....	29
Imagem 12 – Resíduos de actividades de gestão do território [12] .....	29
Imagem 13 – Produtos bioenergéticos a partir da madeira [13].....	32
Imagem 14 – Pelletes de Madeira [14] .....	33
Imagem 15 – Produção industrial de pelletes de madeira [15] .....	34
Imagem 16 – Estilhas de madeira [16] .....	34
Imagem 17 – Toros de madeira [17] .....	36
Imagem 18 – Briquetes de Madeira [18].....	37
Imagem 19 – Fardos de palha [19].....	37
Imagem 20 – Processos de queima da Biomassa.....	41
Imagem 21 – Reactor de pirólise [23] .....	43
Imagem 22 – Princípios básicos de vários tipos de gaseificadores [24].....	45
Imagem 23 – Zonas de gaseificação num gaseificador de fluxo directo de leito fixo [25].....	46
Imagem 24 – Lareira aberta a lenha [26] .....	48
Imagem 25 – Salamandra [27] .....	48
Imagem 26 – Caldeira a pelletes [28] .....	48
Imagem 27 – Esquema de uma caldeira com fornalha com grelha inclinada equipada com ciclone [29] .....	50
Imagem 28 – Caldeira com grelha de alimentação inferior por parafuso sem-fim, equipada com ciclone [30] .....	50
Imagem 30 – Esquema de uma caldeira com grelha plana fixa [32] .....	51
Imagem 29 – Esquema de uma caldeira com grelha móvel rotativa [31].....	51

Imagem 31 – Esquemas de diversos tipos de caldeiras aquotubulares em perfil e em planta [33] .....	52
Imagem 32 – Esquema de uma câmara de combustão rectangular de uma caldeira aquotubular [34] .....	53
Imagem 33 – Esquema de uma caldeira aquotubular, em perfil e em planta [35] .....	54
Imagem 34 – Esquema de soluções possíveis de paredes tubulares [36] .....	55
Imagem 35 – Esquema de uma caldeira aquotubular para combustíveis sólidos [37].....	56
Imagem 36 – Precipitador Electrostático [39] .....	62
Imagem 37 – Carregamento das partículas [40].....	63
Imagem 38 – Adesão das partículas às placas colectoras [41].....	63
Imagem 39 – Batimento das partículas [42] .....	63
Imagem 40 – Ciclones de fluxo invertido [43].....	66
Imagem 41 – Associação de ciclones em paralelo (multiciclone) [44] .....	67
Imagem 42 – Trajecto efectuado pelas partículas no ciclone [46].....	69
Imagem 43 – Escoamento gasoso através de um ciclone de entrada tangencial e de fluxo invertido [47].....	69
Imagem 44 – Filtros de Mangas [54].....	75
Imagem 45 – Constituição da parte interior de um filtro de mangas [55].....	76
Imagem 46 – Central de termoeléctrica de biomassa em Belmonte.....	87
Imagem 47 – Armazém de biomassa com estilha de madeira .....	88
Imagem 48 – Caldeira utilizada na CTBB.....	89
Imagem 49 – Combustão de biomassa no interior da caldeira.....	89
Imagem 50 – Multiciclone .....	90
Imagem 51 – Filtro de mangas .....	90
Imagem 52 – Esquema do alçado do ciclone que se obteve tendo em conta os cálculos efectuados .....	94
Imagem 53 – Ciclone visto em perspectiva [66] .....	94
Imagem 54 – Esquema dos equipamentos utilizados para o caso de estudo [68] .....	99

## Índice de tabelas

Tabela 1 – Combustíveis sólidos [20] .....	39
Tabela 2 – Combustíveis líquidos [21] .....	39
Tabela 3 – Combustíveis gasosos [22].....	39
Tabela 4 – Tipos de Filtros Industriais [38].....	61
Tabela 5 – Comparação entre ciclones simples e multiciclones [45].....	68
Tabela 6 – Propriedades das fibras utilizadas nos filtros de mangas [56] .....	78
Tabela 7 – Factor multiplicativo a aplicar à área de filtração [62] .....	84
Tabela 8 - Utilização, vantagens e desvantagens dos principais tipos de despoeiradores.....	85
Tabela 9 – Configurações mais comuns de algumas famílias de ciclones de entrada tangencial [64].....	92
Tabela 10 – Relação entre o diâmetro das partículas e o rendimento do ciclone .....	96

## Índice de ilustrações

Ilustração 1 – Constituição de um ciclone [48] .....	70
Ilustração 2 – Representação esquemática de um filtro de mangas [59] .....	83
Ilustração 3 – Ciclo de Rankine [63] .....	88

## Índice de gráficos

Gráfico 1 - Curva de eficiência de ciclones.....	96
--	----

# Capítulo I

## 1 Introdução

Portugal é um país sem reservas de combustíveis fósseis. O recurso à bioenergia, (energia obtida a partir da biomassa), constitui uma alternativa possível, pois complementa a aquisição de combustíveis fósseis e, como tal, poderá estabelecer-se como variável determinante na solução de muitos dos problemas energético ambientais, económicos, e mesmo sociais, que se encontram associados ao consumo do carvão, petróleo ou gás natural.

De facto, o uso de biomassa como fonte alternativa à energia primária de origem fóssil pode permitir uma melhoria da qualidade de vida, particularmente em Países sem reservas de combustíveis, como Portugal, através da diminuição da sua dependência económico - energética do exterior e da redução dos impactos negativos resultantes da queima de combustíveis fósseis tais como o carvão, petróleo, gás natural ou derivados.

O uso da biomassa como um combustível renovável pode reduzir a pegada ecológica de todas as nações no que respeita à energia, e poderá ser a solução para a minimização das alterações climáticas e de outros problemas ambientais.

### 1.1 Estrutura do trabalho

O presente trabalho encontra-se dividido em capítulos. Após a introdução aborda-se no segundo capítulo, será abordado o tema relativo à Biomassa, fazendo a caracterização dos diferentes tipos de biomassa e ainda as vantagens e desvantagens da sua utilização. Posteriormente serão referidas as fontes de onde provem essa mesma Biomassa e as finalidades ou produtos resultantes dessas fontes, fazendo a distinção entre as fontes sólida, líquida e gasosa. Serão aprofundados os produtos resultantes das fontes de Biomassa sólida.

No terceiro capítulo abordam-se os diferentes métodos de combustão da Biomassa onde será aprofundada a combustão por gaseificação em leito fixo e ainda os equipamentos que podem ser utilizados na combustão de Biomassa em diferentes locais, desde equipamentos domésticos, industriais a grandes equipamentos de combustão.

Ainda no terceiro capítulo, caracterizam-se os diferentes equipamentos de controlo da combustão de forma a minimizar os efluentes gasosos lançados para a atmosfera.

No quarto capítulo caracterizam-se os equipamentos de tratamento de efluentes gasosos, bem como as suas vantagens e desvantagens.

No quinto capítulo, caso em estudo, será efectuado o dimensionamento de dois equipamentos de controlo das emissões de partículas que podem resultar da combustão de Biomassa. No caso em questão opta-se pelo dimensionamento de um Multiciclone e um Filtro de mangas, uma vez que são equipamentos mais eficientes quanto ao tratamento de efluentes gasosos. Este dimensionamento terá como base de apoio alguns dados reais da Central Termoeléctrica de Biomassa em Belmonte, o que irá permitir obter resultados e retirar algumas conclusões.

## **1.2 Objectivos**

O presente projecto tem como principais objectivos a caracterização da Biomassa, a sua combustão, as tecnologias de queima, os equipamentos de controlo dos efluentes gasosos e ainda um caso de estudo tendo como base o dimensionamento de equipamento de controlo de emissões de partículas; mais precisamente de um multiciclone e de um filtro de mangas, considerando alguns dados reais da Central Termoeléctrica de Biomassa em Belmonte, e encontrar desta forma, soluções para diminuir a quantidade de material particulado lançado para a atmosfera.

## Capítulo II

## 2 Biomassa

Neste capítulo serão abordados os seguintes temas: Biomassa, potencial da biomassa, fotossíntese, tipos de biomassa, fontes e produtos de biomassa.

A biomassa pode ser vista como uma forma de armazenamento da energia solar. As plantas convertem a energia solar através da fotossíntese, com uma eficiência de 0,1%, e armazenam-na, durante muito tempo, nas folhas, nos caules, nas flores, etc.

Do ponto de vista da ecologia, a biomassa é a quantidade total de matéria viva existente num ecossistema ou numa população animal ou vegetal.

Do ponto de vista da geração de energia, abrange os derivados recentes de organismos vivos utilizados como ou para a produção de combustíveis.

A biomassa é utilizada na produção de energia a partir de processos como a combustão de material orgânico produzida e acumulada num ecossistema, porém nem toda a produção primária passa a incrementar a biomassa vegetal do ecossistema. Parte dessa energia acumulada é empregue pelo ecossistema para a sua própria manutenção.

As suas vantagens são o baixo custo, ser renovável, permitir o reaproveitamento de resíduos e ser menos poluente que outras formas de energia, nomeadamente a obtida a partir de combustíveis fósseis. A queima de biomassa considera-se menos poluente porque a libertação de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) é feita daquilo que se considera o ciclo curto do carbono, isto é: o carbono libertado para a atmosfera já tinha sido absorvido pelas plantas que deram origem ao combustível, tornando assim, o balanço de emissões de CO<sub>2</sub> nulo (imagem1). Diminui o perigo de fogos florestais pois contribui para a limpeza e manutenção de matas.

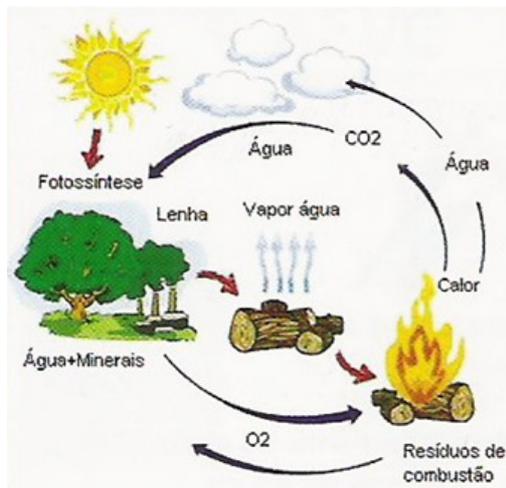


Imagem 1 – Ciclo da Biomassa [1]

A biomassa é a única energia renovável que pode ser convertida em combustíveis gasosos, líquidos ou sólidos, por meio de tecnologias de conversão.

A variedade de utilizações possíveis da biomassa, as vantagens de um armazenamento seguro e inofensivo e a possibilidade de integrar fornecedores locais de combustíveis, nomeadamente empresas agrícolas e florestais, oferecem um vasto campo de aplicações sustentáveis.

A utilização de biomassa, é a forma mais antiga de fornecer energia à humanidade. Contudo, as fontes modernas de bioenergia, tais como as briquetes, pellets ou estilhas de madeira, troncos de madeira e o gás proveniente dela, biogás e óleo vegetal ou biodiesel, oferecem um elevado potencial para utilização de energias inovadoras. Estes combustíveis naturais podem ser usados em aplicações estacionárias, para fornecimento de calor e energia a habitações, edifícios públicos, na agricultura e na indústria. O biodiesel, gerado a partir de colheitas para fins energéticos, pode ser usado em motores de veículos automóveis, para os quais apenas são necessárias pequenas modificações.

Os avanços tecnológicos e a reputação da biomassa, como portadora de energia renovável universal, estão a permitir um aumento da avaliação do seu potencial. De referir que para além dos efeitos ambientais positivos, existem também diversos aspectos económicos e sociais envolvidos, nomeadamente a criação de postos de trabalho resultantes da colheita, tratamento e transporte da biomassa.

Apesar de todas as vantagens referidas anteriormente a biomassa possui como todas as restantes energias algumas desvantagens, tais como: desflorestação de florestas, destruição de habitats, possui um menor poder calorífico quando comparado com outros combustíveis e ainda, dificuldades no transporte e no armazenamento de biomassa sólida.

## 2.1 Potencial da Biomassa

Nas áreas rurais do planeta, crescem cerca de 200 biliões de toneladas de biomassa, com uma capacidade de energia de aproximadamente 30000 exajoule (1exajoule =  $10^{18}$  joule), valor equivalente ao volume de energia de todas as reservas das fontes de energia fóssil. Um crescimento anual, de cerca de 15 biliões de toneladas de biomassa, através da fotossíntese, representa um potencial energético de 2250 exajoule.

Na imagem que se segue podem observar-se alguns estados físicos em que se pode encontrar a biomassa.



**Imagem 2 – Tipos de Biomassa [2]**

Infelizmente, este vasto potencial não pode ser usado directamente para energia, visto que está espalhado sobre toda a massa terrestre. Apenas uma parte deste potencial está disponível para utilização.

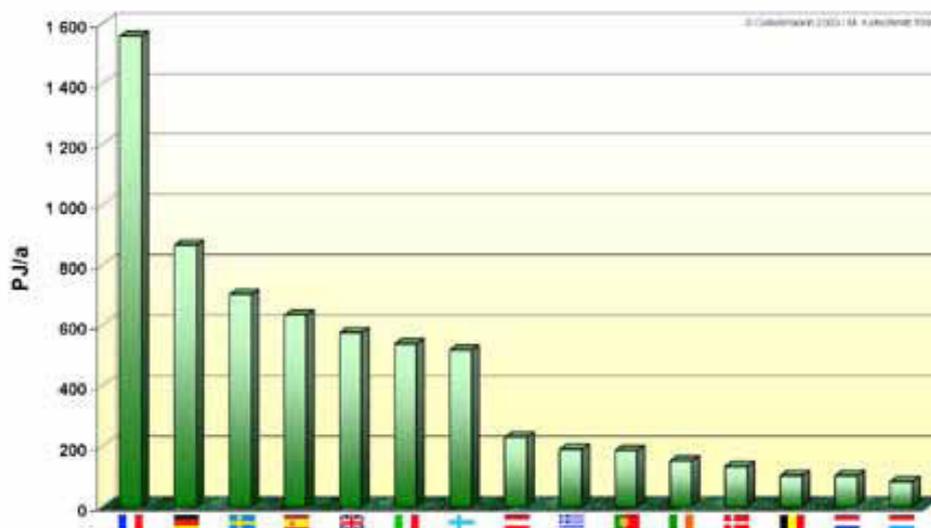


Imagem 3 – Potencial térmico de biomassa em média na Europa [3]

Na União Europeia, mais de 2200 petajoule (1petajoule =  $10^{15}$  joule) de energia por ano, são produzidos e armazenados sob a forma de biomassa (imagem 3). Destes, cerca de 1700 petajoule são usados directamente para gerar calor, enquanto que os restantes 500 petajoule são usados para gerar electricidade.

A Finlândia, e a Suécia, utilizam quase metade do seu potencial de biomassa.

#### ❖ Processo da Fotossíntese

O processo da fotossíntese permite a criação de biomassa a partir do dióxido de carbono na atmosfera, água e nutrientes dos solos, e é a base de toda a vida no planeta Terra. A fotossíntese assenta em dois processos chave:

- As plantas obtêm energia a partir da radiação solar, o que permite a sua autotrofia. Por outro lado, as plantas formam a base nutricional para os outros organismos, tais como os humanos e os animais, que sendo formas de vida heterotróficas, não são capazes de obter a sua energia a partir da luz solar.
- O processo da fotossíntese é o principal responsável pela libertação do oxigénio que é utilizado pelos organismos heterotróficos.

O pigmento verde das folhas, a clorofila, é a “central energética” interna das plantas. Movidas pela energia solar, as plantas convertem o dióxido de carbono em biomassa, na forma de açúcar e de amido. Para além da radiação solar, a água e os minerais (nutrientes da planta) são necessários neste processo, sendo estes retirados do solo através das raízes.

### ❖ **O Carbono no Planeta Terra**

No planeta Terra, o elemento carbono passa por um ciclo constante. Neste ciclo, o carbono é associado em cadeias, por meio da fotossíntese. As plantas servem de alimento aos animais, sendo criada a sua massa a partir destas cadeias. Quando os vegetais ou a biomassa animal entram em decomposição, o carbono é libertado novamente como dióxido de carbono.

No total, mais de 575 biliões de toneladas de carbono passam por uma constante transformação. Quando se queima a biomassa, o dióxido de carbono é libertado para a atmosfera. No entanto, estas emissões de dióxido de carbono não são consideradas no desequilíbrio do clima. Esta consideração baseia-se nos períodos de equilíbrio que estão envolvidos nas mudanças climáticas, ou seja, à medida que uma árvore cresce, esta absorve dióxido de carbono na sua biomassa.

Quando a árvore morre, inicia-se um processo gradual de decomposição na floresta, na qual os microrganismos quebram as cadeias de carbono da árvore nas suas partes constituintes. Dependendo do tipo de madeira e da sua localização, este processo pode levar desde um a vários anos. No ciclo natural de decomposição, também denominado “combustão fria”, é libertada a mesma quantidade de energia que originalmente foi armazenada. No total, o processo de decomposição liberta exactamente a mesma quantidade de dióxido de carbono.

## **2.2 Tipos de Biomassa**

A biomassa é a massa total de substâncias orgânicas que ocorrem num habitat. As formas de biomassa no planeta são diversas (imagem 4). Para além disso existem diferenças nas utilizações primárias de biomassa. Além da indústria alimentar, a biomassa pode ser usada noutras indústrias, tais como, de manufacturação ou construção.



Imagem 4 – Biomassa variada [4]

Quando o uso original termina, pode ser efectuado um uso energético secundário da biomassa. Por exemplo, os resíduos orgânicos que são uma mistura de material desperdiçado (imagem 5), pode ser usado como fonte de produção de energia regenerativa.



Imagem 5 – Resíduos Orgânicos [5]

A energia contida nos resíduos orgânicos é geralmente usada através da geração de biogás. Nos aterros, existe uma conversão dos resíduos orgânicos em metano. Em alguns casos, contudo, pode ser vantajosa a fermentação directa destes resíduos em sistemas de tratamento anaeróbio. Para resíduos com alto teor de madeira, existe a possibilidade de serem sujeitos a secagem e à queima.

### 2.3 Fontes e Produtos de Biomassa

A biomassa pode ser dividida em quatro categorias, de acordo com a sua origem:

- **Culturas para fins energéticos**

As colheitas para fins energéticos são cultivadas principalmente para a produção de energia. A sua função é capturar a radiação solar para armazená-la na biomassa. Exemplos de colheitas de energia são: o girassol (imagem 6), o milho, entre outros.



Imagem 6 – Colheita de girassol para energia [6]

- **Resíduos agrícolas e florestais**

Os resíduos que são gerados na colheita de cereais e no corte de árvores (imagem 7), tal como a palha e os resíduos de madeira, são desperdícios naturais. Este grupo de “sub-produtos” é especialmente adequado para a reciclagem energética, porque reduz os custos de produção dos produtos principais, ou aumenta o rendimento da cadeia de cultivo.



Imagem 7 – Corte de árvores [7]

- **Sub-produtos orgânicos**

O processamento da biomassa para criação de produtos, forma um grupo adicional de sub-produtos. Estes sub-produtos incluem os resíduos orgânicos, os efluentes da agro-pecuária e os resíduos do processamento industrial da madeira e de fibras vegetais. Nestes casos, a reciclagem energética pode conduzir a um aumento da utilidade e assegurar que partes do processo de produção sejam permanente e ambientalmente sustentáveis.

- **Resíduos orgânicos**

Os resíduos orgânicos incluem os resíduos domésticos e as lamas dos efluentes domésticos e industriais, como por exemplo, os resíduos da produção alimentar. Estes resíduos estão geralmente sujeitos à legislação respectiva. Consequentemente, deve ser cumprida uma gama completa de requisitos legais, desde a origem até ao controlo epidémico.

As fontes de biomassa utilizadas como combustíveis, são classificadas de acordo com o estado de agregação em que se encontram: sólido, líquido ou gasoso.

### 2.3.1 Fontes de Biomassa Sólida

A maior fonte de biomassa sólida provém de produtos e resíduos obtidos a partir da madeira. Estes são obtidos quando é retirada a lenha das florestas e quando os desperdícios são utilizados no processamento industrial de produtos de madeira. Em muitos locais, outros sub-produtos, nomeadamente a palha são usados para produzir energia, a partir da biomassa.

No desbaste das florestas, além dos troncos das árvores, que são usados para as indústrias de mobiliário e construção, são também recolhidos resíduos de madeira de qualidade inferior. Por cada hectare de floresta, podem ser obtidas, a partir destes resíduos 0,4 - 0,8 toneladas de lenha seca.

Para além disso, outras quantidades de resíduos de madeira, recolhidas durante acções de manutenção da floresta, permitem um rendimento combustível anual de cerca de 1,5 toneladas por hectare, para uma área florestal de uso permanente.



Imagem 8 – Colheita de Madeira mecanizada [8]

Nas explorações florestais, as árvores são derrubadas com o auxílio de máquinas, que utilizam um braço com uma serra eléctrica montada (imagem 8). Adicionalmente, estas máquinas podem remover automaticamente os ramos do tronco, retirar a casca escura da madeira e cortar o tronco em partes.

Este método significa que, parte do valor acrescentado do processamento da madeira é efectuado antes de a madeira sair da floresta. Quando os troncos redondos são transformados em pranchas e vigas, são produzidas grandes quantidades de resíduos (imagem 9). Contudo, a maior parte destes é utilizada na indústria da madeira para outros materiais. Estilhas de madeira sem casca, são matéria-prima de excelente qualidade para o processamento de cartão.



**Imagem 9 – Madeira industrial e os seus subprodutos [9]**

Contudo, outra parte destes resíduos continua a ter fragmentos de impurezas e é, portanto, inadequada para a utilização como matéria-prima. Estes pedaços de casca são ideais para reciclagem energética (imagem 10). Devido ao elevado teor de cinzas, estes resíduos são principalmente utilizados em centrais de fornecimento de calor de grandes dimensões e em centrais de cogeração, como substrato de co-aquecimento.



**Imagem 10 – Casca (subproduto do processamento da madeira) [10]**

Outros resíduos significantes, provenientes da agricultura, incluem a palha e o feno (imagem 11).



**Imagem 11 – Colheita mecanizada de palha com fardo prensado [11]**

A palha e outros produtos deste tipo possuem características de combustão diferentes dos combustíveis lenhosos.

Para além dos materiais referidos, os produtos no final do seu ciclo de vida, são ideais para a reciclagem energética. O processamento e a combustão de madeira velha é um exemplo.

Devido à sua utilização prévia, esta biomassa pode estar contaminada com substâncias tóxicas, tais como químicos, tintas ou algo similar. Por esta razão, muitos países definem restrições à reciclagem energética da madeira velha. Queimar a madeira em pequenos sistemas de combustão é permitido, se o processamento da madeira for puramente mecânico e se a madeira contiver somente contaminantes pouco perigosos.

Para além da possível utilização de madeira velha, a madeira recolhida durante as actividades de gestão do território, nomeadamente em trabalhos de manutenção nas estradas e auto estradas e dos trabalhos em parques florestais, deve ser tida em conta. Estes resíduos de madeira são geralmente uma mistura de madeira, folhas e troncos (imagem 12).



**Imagem 12 – Resíduos de actividades de gestão do território [12]**

A utilização energética serve também como um meio para a eliminação destes resíduos. O teor energético destas misturas é relativamente baixo, devido ao grande número de impurezas, nomeadamente por causa das quantidades de solo que geralmente existem na mistura, que gera um teor elevado de cinzas. As outras impurezas existentes, tais como embalagens de plástico, sacos e outros resíduos conduzem a níveis elevados de substâncias tóxicas libertadas para a atmosfera.

### 2.3.2 Fontes de biocombustíveis líquidos

Das fontes de biocombustíveis líquidos, actualmente as que têm mais aplicações no mercado são: o óleo vegetal, o biodiesel e o etanol.

- **Óleo vegetal**

O óleo vegetal natural é usado em motores de combustão. Esse uso é recente, mas, apesar disso existem aplicações com sucesso, como combustível em motores diesel adaptados.

- **Biodiesel**

O biodiesel é uma alternativa aos combustíveis, derivado do petróleo. Pode ser usado em carros e qualquer outro veículo com motor diesel.

É fabricado a partir de fontes renováveis (girassol, soja), é um combustível que emite menos poluentes que o diesel.

- **Etanol**

O etanol é usado em pequena escala, como combustível puro, para motores movidos a gasolina. É ainda, muito utilizado como componente de mistura nos combustíveis fósseis. É possível misturar etanol até 10% em volume com combustíveis para motores a gasolina, sem haver necessidade de converter os motores.

### 2.3.3 Fontes de biocombustíveis gasosos

As fontes gasosas de biomassa são obtidas a partir da conversão da biomassa sólida ou resíduos de suinicultura, tais como estrume. A fermentação anaeróbia de metano e a produção termoquímica de gases de síntese são dois métodos diferentes de transformação da biomassa, em fontes gasosas de bioenergia.

Como fontes de biocombustíveis gasoso podem indicar-se os seguintes:

- **Biogás**

O biogás é um combustível gasoso com um conteúdo energético elevado semelhante ao gás natural, composto, principalmente, por hidrocarbonetos de cadeia curta e linear. Pode ser utilizado para geração de energia eléctrica, térmica ou mecânica.

- **Gases de síntese**

Os gases de síntese são produzidos durante a gaseificação e a combustão lenta da biomassa, em condições de défice ou exclusão do oxigénio. Os componentes combustíveis destes gases consistem em: hidrogénio ( $H_2$ ), monóxido de carbono (CO) e metano ( $CH_4$ ). Os componentes inertes nestes gases são o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e o azoto ( $N_2$ ).

### 2.3.4 Produtos de Biomassa Sólida

As principais fontes e produtos finais de biomassa sólida de madeira, que estão disponíveis no mercado, são as seguintes: briquetes, palha, toros, estilhas e pellets, como se pode constatar na imagem 13.



Imagem 13 – Produtos bioenergéticos a partir da madeira [13]

- **Pelletes de Madeira**

As pelletes são formas mecanicamente estáveis de pó de madeira (imagem 14). Esta transformação (alta densidade de produto) permite um aumento da eficiência de muitos processos, tais como, um aumento do fluxo favorável e melhoria de propriedades de combustão.

Uma das vantagens de se utilizarem pelletes de madeira está no seu tamanho normalizado, permitindo que os produtores de caldeiras a madeira, mesmo para gamas de saída baixas até 50 kW (quilowatt), fabriquem sistemas de aquecimento completamente automáticos. Os pelletes de madeira têm uma elevada densidade energética permitindo que os sistemas de aquecimento obtenham autonomias equivalentes a sistemas com óleo de fontes de energia fóssil.

Os pelletes de madeira para aquecimento consistem em serradura ou estilhas de madeira não contaminadas. Durante a produção, 6 a 8 metros cúbicos de estilhas de madeira ou serradura são comprimidas a altas pressões, num metro cúbico de pelletes de madeira.



Imagem 14 – Pelletes de Madeira [14]

Antes da produção de pelletes de madeira, os materiais são secos. O processo de produção resulta, geralmente, em pelletes com um comprimento entre 5 e 43 mm (milímetros). A compactação acima dos 1000 bares permite que estes se mantenham estáveis, durante o transporte e enchimento, até à sua queima.

Como resultado da secagem e compactação, as pelletes têm um teor de água máximo de 8%. Para além disso apresentam uma densidade de mais de  $650 \text{ kg/m}^3$  (quilograma por metro cúbico). Assim as pelletes de madeira apresentam um poder calorífico constante entre 4,9 e 5,4 kW/kg (quilowatt por quilograma). Regra geral, 2 kg de pelletes de madeira substituem cerca de 1 litro de óleo de aquecimento.

Na produção de pelletes de madeira (imagem 15), também são usadas colas naturais, como o amido do milho. Estas colas são adicionadas para facilitar o processo de prensagem, e para melhorar o equilíbrio energético e a resistência abrasiva do produto. O limite máximo para as colas é de 2%, que estão estabelecidos de modo a minimizar o teor de cinzas.

A produção de pelletes de madeira, com os seus processos de prensagem e secagem, é pouco eficiente do ponto de vista energético, corresponde a menos de 2% do teor de energia do produto final. Por esta razão, os pelletes de madeira são significativamente melhores do que as fontes de energia fóssil, para as quais 10 a 12% da sua energia é necessária, para tratamento e purificação.



Imagem 15 – Produção industrial de pellets de madeira [15]

- **Estilhas de madeira**

Para aquecimento automatizado com madeira, em sistemas com limites de saída elevados, superiores a 50 kW, são usadas estilhas de madeira. Estas são produzidas a partir dos resíduos de madeira colhida e do processamento de madeira, através de cortadores mecânicos.

Para a produção de estilhas de madeira, existem disponíveis três aparelhos diferentes de corte mecânico (cortador, cortador cilíndrico e cortador de parafuso).

As estilhas de madeira têm geralmente um comprimento entre 1 e 10 centímetros (imagem 16). Têm até 4 cm de largura e estão divididas em três categorias comerciais: corte fino menor que 3 cm, corte médio menor que 5 cm e corte grosso menor que 10 cm. A grande uniformidade do tamanho nas estilhas de madeira e um teor baixo em água são os requisitos essenciais para uma utilização eficaz, em sistemas de aquecimento automatizados.



Imagem 16 – Estilhas de madeira [16]

Nas estilhas não devem existir impurezas, tais como, pedras, objectos de metal ou outros materiais estranhos. Para além disso, as estilhas de madeira não devem estar muito húmidas, para que se possa obter uma combustão limpa. A madeira fresca da floresta tem um teor de água de 50%. Este combustível é adequado para as caldeiras que

se encontram nas grandes centrais de produção de calor ou de produção de energia eléctrica, como a Central Termoeléctrica a Resíduos Florestais de Mortágua (Portugal).

A estilha produzida nas serrações, com uma percentagem de humidade da ordem dos 40-50%, que é usada, por exemplo, na indústria de pasta e papel. Esta estilha tem melhores propriedades de combustão, mas é ainda muito húmida para as caldeiras pequenas.

A estilha proveniente de cortes de árvores, sem ramos e folhas, deixadas a secar aproximadamente seis meses antes da sua utilização, contém cerca de 30% de humidade e deve ser uniforme em qualidade e tamanho. Este combustível é adequado para as caldeiras instaladas em edifícios residenciais ou de serviços.

As estilhas de madeira seca apresentam ainda um poder calorífico de 13,4 GJ (1gigajoule= $10^9$  joule) por tonelada.

As estilhas de madeira, têm de ser derivadas de madeira pura. As impurezas na forma de plásticos ou tintas, que não se conseguem remover da madeira velha, conduzem ao aumento de emissão de poluentes e do teor de cinzas. Por esta razão, o seu uso em caldeiras sem purificação do gás de exaustão é geralmente proibido.

A madeira processada em estilhas de madeira pode ser usada em todos os sistemas de combustão disponíveis.

- **Toros**

A produção de toros divididos para fins energéticos, é a forma tradicional de preparação da madeira. Neste processo, a madeira é serrada em peças até 1 metro de comprimento (imagem 17). Estão estabelecidas outras três medidas de comprimento de toros: 25 cm, 33 cm e 50 cm. Todos os produtores de caldeiras têm optimizadas as geometrias das câmaras de combustão para estes comprimentos.

Depois de ser cortada no comprimento desejado, a madeira é dividida, para optimizar a área de superfície para combustão e para facilitar a secagem da madeira. Quando a madeira é separada manualmente, o toro é mantido em pé e separado em quatro partes ao comprido.



Imagem 17 – Toros de madeira [17]

Para utilizar os toros em aquecedores é importante que a madeira esteja seca. Um bom toro de madeira tem um teor de água menor que 20 %. Este valor atinge-se depois de dois anos de armazenamento ao ar livre. Se este requisito for satisfeito, pode esperar-se um teor de cinzas residual dos toros menor que 0,5%.

A produção de toros é a forma energeticamente mais eficiente de preparação de madeira, como produto de biomassa.

- **Briquetes de madeira**

Os briquetes de madeira são prensados do mesmo modo que as pelletes, a partir das estilhas de madeira e serradura. Neste caso também se utiliza madeira sem casca. Durante o processo de manufactura, a madeira tem de secar, até se obter um teor de água inferior a 10%.

Tal como os pelletes, os briquetes de madeira são compactados no processo de manufactura, comprimindo um metro cúbico de madeira rija, em 450 kg de briquetes de madeira. Estes briquetes possuem um poder calorífico de 18,5 MJ/kg (1 megajoule= $10^6$  joule).



**Imagem 18 – Briquetes de Madeira [18]**

Devido á sua elevada densidade de energia, bom poder calorífico do material de madeira compactado e os baixos resíduos, com um máximo de 0,5% de teor de cinzas, tornam os briquetes de madeira um combustível ideal para sistemas de combustão pequenos, alimentados manualmente, tais como fornos, queimadores de madeira e fornos cerâmicos. Como não contêm nenhuma resina de árvores, não tendem a emitir faúlhas. Por esta razão, os briquetes de madeira também são muito adequados para o uso em lareiras abertas.

- **Fardos de Palha**

A palha e outros produtos de ramagem são tratados em fardos compactados e em rolos. Os fardos rectangulares têm comprimentos de 80 cm a 250 cm, larguras de 30 cm a 120 cm e alturas de 30 a 130 cm.

A compactação, durante a produção destes fardos, atinge densidades de armazenamento de 130 a 160 kg/m<sup>3</sup>.



**Imagem 19 – Fardos de palha [19]**

### 2.3.5 Produtos biocombustíveis líquidos

Na Europa, o biodiesel, é o único biocombustível líquido disponível no mercado geral e nas estações de distribuição. Embora as grandes empresas petrolíferas por toda a Europa não ofereçam biodiesel nos seus postos de distribuição, em muitos países existe uma rede de estações de enchimento de distribuidores independentes, que fornecem biodiesel.

Tanto na Europa como nos EUA, o etanol e outras fontes de biocombustíveis líquidos são usados como componentes de mistura e aditivos.

### 2.3.6 Produtos biocombustíveis gasosos

Os produtos biocombustíveis gasosos são geralmente produzidos para aplicações fixas. Mesmo existindo exemplos de abastecimento de biogás em redes de gás natural, estes produtos normalmente estão ligados a uma instalação, e não estão facilmente disponíveis no mercado. No entanto já foi testado o uso de biogás em automóveis e em máquinas agrícolas.

Nas tabelas seguintes encontra-se representado o poder calorífico inferior de alguns combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, bem como o seu teor em humidade, temperatura de ebulição, entre outros.

Tabela 1 – Combustíveis sólidos [20]

Combustível	PCI (kJ/kg)	Humidade (%)
Pelletes de madeira	17640	10
Briquetes de madeira	18500	-
Estilhas de madeira	13400	30
Serradura	12285	30
Bagaço de azeitona	15135	-
Casca do pinho	17360	15
Lenha	11010	35

Tabela 2 – Combustíveis líquidos [21]

Combustível	PCI (kJ/kg)
Gasoleo	42700
Diesel-oil	41650
Bumer-oil	41025
Thin-fuel-oil	40815
Thick-fuel-oil	40190

Tabela 3 – Combustíveis gasosos [22]

Combustível	PCI (kJ/m <sup>3</sup> )	Temperatura de ebulição (°C)	Fórmula química
Butano	45650	- 0,5	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
Propano	46385	- 42	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
Propeno	48770	- 47	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
Gás natural	37905	-	CH <sub>4</sub>

## Capítulo III

### 3 Combustão e equipamentos de queima

#### 3.1 Combustão da Biomassa

Neste capítulo serão abordadas as diferentes formas de combustão de Biomassa, bem como os tipos de equipamentos utilizados (equipamentos domésticos e equipamentos industriais).

Devido à variabilidade de materiais que podem ser considerados biomassa, existem diversos processos onde se transforma a biomassa em energia, eles são divididos em três tipos: os que envolvem combustão directa, os que envolvem processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) e os que envolvem processos biológicos (biodigestores).

O diagrama que se segue apresenta resumidamente os processos de queima de biomassa dos quais se falará de seguida:

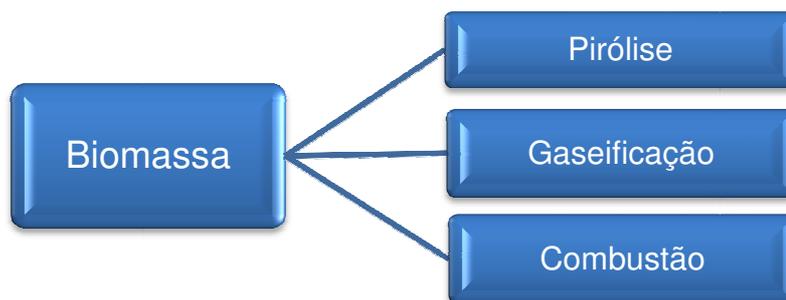


Imagem 20 – Processos de queima da Biomassa

##### 3.1.1 Pirólise

A pirólise pode ser efectuada por duas formas: a carbonização e a pirólise rápida.

###### ❖ Carbonização

A pirólise por carbonização, é o processo mais simples e mais antigo de conversão de um combustível (normalmente lenha) noutra de melhor qualidade e conteúdo energético (essencialmente carvão).

O processo consiste em aquecer o material original (normalmente entre 300°C e 500°C), na ausência quase por completo de ar, até que o material volátil seja retirado. O principal produto final (carvão) tem uma densidade energética duas vezes maior relativamente á do material de origem e queima em temperaturas muito mais elevadas.

A relação entre a quantidade de lenha (material de origem) e a de carvão (principal combustível gerado) varia muito, de acordo com as características do processo e o teor de humidade do material de origem. Em geral, são necessárias para a produção de uma tonelada de carvão; quatro a dez toneladas de lenha.

Em processos mais sofisticados, costuma controlar-se a temperatura, de forma a melhorar a qualidade do combustível gerado e o aproveitamento dos resíduos. Neste caso, a proporção de carvão pode chegar a 30% do material de origem. Embora necessite de tratamento prévio (redução da acidez), o líquido produzido pode ser usado como óleo combustível.

#### ❖ **Pirólise rápida**

Nos processos de pirólise rápida, sob temperaturas entre 800°C e 900°C, cerca de 60% do material transforma-se num gás rico em hidrogénio e monóxido de carbono (apenas 10% de carvão sólido), o que a torna uma tecnologia competitiva com a gaseificação (contudo este gás resultante da pirólise normalmente é utilizado para calor de processo). Contudo, a pirólise convencional (300°C a 500°C) ainda é a tecnologia mais atractiva, devido ao problema do tratamento dos resíduos, que são maiores nos processos com temperaturas mais elevadas.

A pirólise rápida é um processo relativamente recente. Tem sido alvo de uma grande atenção por parte dos investigadores, uma vez que o combustível é líquido e apresenta uma maior flexibilidade e um maior potencial de mercado podendo facilmente ser armazenado e transportado.

A pirólise ocorre num dispositivo designado por reactor de pirólise (imagem 21), o qual possui três zonas específicas:

- Zona de secagem: nesta zona as temperaturas encontram-se na ordem dos 100°C a 150° C.
- Zona de pirólise: onde ocorrem as reacções propriamente ditas, sendo elas a volatilização, a oxidação e a fusão. As temperaturas nesta fase

variam de 150°C a 450°C. Também é neste local que são colectados os produtos (álcoois, óleo combustível, alcatrão, entre outros).

- Zona de arrefecimento: nesta fase os resíduos gerados pelo processo são recolhidos (cinzas e bio-óleo).



Imagem 21 – Reactor de pirólise [23]

### 3.1.2 Gaseificação

A Gaseificação é um processo endotérmico ao longo do qual um combustível sólido, biomassa, por exemplo, é convertido num gás de baixa ou média capacidade calorífica.

Uma instalação de gaseificação é constituída pelos seguintes componentes:

- Processamento: armazenamento, transporte da biomassa e redução da mesma ao tratamento necessário.
- Gaseificador: dotado de um alimentador próprio para não haver fuga dos gases.
- Tratamento dos gases: arrefecimento e limpeza dos gases.
- Sistema de controlo: tais como pressão e temperatura.
- Tratamento dos resíduos: considerando o potencial tóxico dos mesmos.

O oxidante para o processo de gasificação pode ser o oxigénio do ar atmosférico ou o oxigénio puro. Os sistemas que utilizam oxigénio puro permitem produzir um gás

de maior capacidade calorífica, sendo também mais rápida a sua produção. No entanto, os custos de produção aumentam devido à necessidade de aquisição do oxigénio puro.

A gaseificação possui várias vantagens sobre a queima de combustível sólido:

- Grande eficiência térmica, variando de 60% a 90%, dependendo do sistema implementado.
- A energia obtida com a queima dos gases produzidos é limpa.
- A produção de energia pode ser controlada e, conseqüentemente, a taxa de gaseificação pode ser facilmente monitorizada e, também, controlada.
- As cinzas e o carbono residual permanecem no gaseificador, diminuindo assim a emissão de partículas.

Contudo o processo de gaseificação apresenta algumas desvantagens entre as quais se destacam:

- Esta técnica é muito mais complexa relativamente á queima directa, o que obriga a cuidados especiais, visto que os gases produzidos são tóxicos.
- A biomassa deverá ser limpa, sem a presença de terras ou outros elementos que possam comprometer o processo de gaseificação.
- Há o potencial de fusão de cinzas, que poderá alterar o desempenho do gaseificador, quando se usa a biomassa com alto teor de cinzas.
- Se não for completamente queimado, o alcatrão, formado durante o processo de gaseificação, pode limitar as suas aplicações.

A gaseificação da biomassa, em particular a gaseificação da madeira, é uma das possibilidades mais eficientes e “amigas do ambiente” para a utilização da biomassa, para gerar energia eléctrica em centrais de pequenas dimensões.

Durante o processo de gaseificação, a biomassa é convertida, o mais completamente possível, a altas temperaturas (acima de 600 °C) num novo suporte de energia, na forma de um gás. Um meio de gaseificação contendo oxigénio (por exemplo, ar) é aplicado à biomassa aquecida. As substâncias orgânicas são desfeitas em compostos combustíveis e o carbono residual sofre uma combustão parcial para monóxido de carbono.

A gaseificação é um sub-processo da combustão no qual o gás é produzido por uma combustão parcial.

Existem vários tipos de gaseificadores, com grandes diferenças de temperatura e/ou pressão (imagem 22). Os mais comuns são os reactores de leito fixo e leito fluidizado.

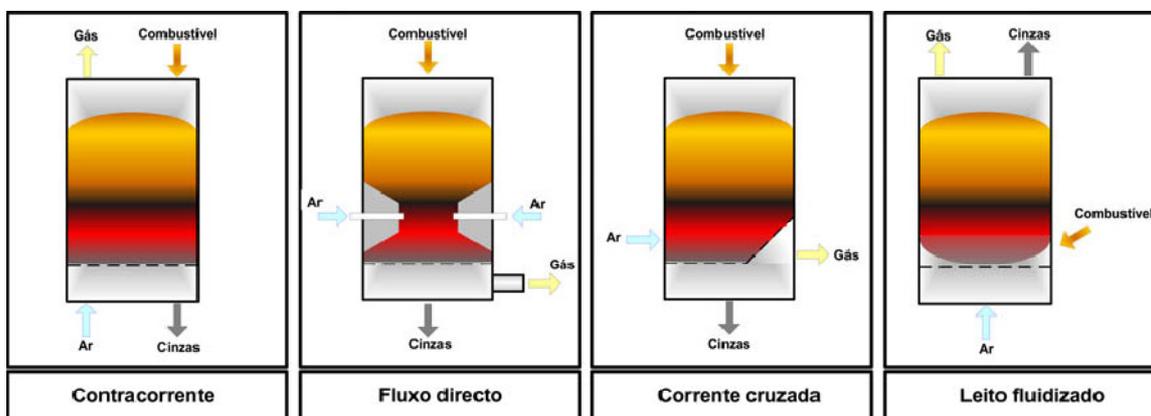


Imagem 22 – Princípios básicos de vários tipos de gaseificadores [24]

Num gaseificador de leito fixo, a biomassa, alimentada normalmente pelo topo do reactor, em pedaços de combustível sólido, é exposta a um meio de gaseificação e passa através de vários estádios, antes de chegar à fossa das cinzas.

O princípio mais utilizado é de gaseificador contra-corrente, que pode ser usado em centrais com uma capacidade de cogeração de biomassa entre 100 kW e 10 MW.

Com um gaseificador de fluxo directo aplica-se uma gaseificação de corrente ascendente, ou seja as direcções do combustível e do gás produzido são as mesmas. Os gases decompostos na zona de pirólise são subsequentemente aquecidos numa zona de oxidação acima de 1000°C. Tem lugar um extenso processo de divisão dos compostos orgânicos de cadeia longa, resultantes em compostos de cadeia curta, convertendo assim a matéria rica em alcatrão, em matéria com baixo teor de alcatrão. Estes reagem na zona de redução subsequente com as cinzas, para formar mais gás (CO<sub>2</sub> em CO).

Os gaseificadores de fluxo directo estão especialmente adaptados para a produção combinada de calor e energia para centrais de baixa capacidade (até 500 kW).

Os gaseificadores de base fixa, usando a técnica de fluxo directo, são adequados à operação comercial, com soluções descentralizadas, especialmente na área da cogeração enquanto que os gaseificadores de base fluidizada são mais adequados para centrais de maiores dimensões.

**Produção de gás a partir da madeira num gaseificador de fluxo directo de base fixa:**

Para centrais de capacidade mais baixa, até 500 kW, são usados na maioria gaseificadores de base fixa, usando o princípio de fluxo directo. As zonas de gaseificação destes sistemas estão indicadas na imagem seguinte:

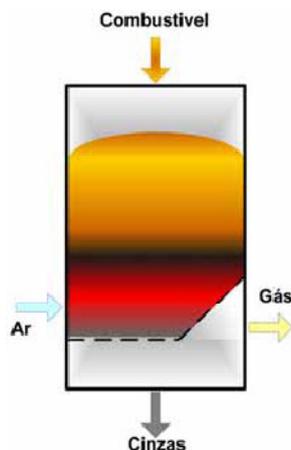


Imagem 23 – Zonas de gaseificação num gaseificador de fluxo directo de leito fixo [25]

A água contida no combustível é primeiro vaporizada a uma temperatura entre os 100°C -200° C (secagem). O próximo passo é a desgaseificação e destilação térmica dos conteúdos, principalmente em elementos de gás, a temperaturas entre 300°C e 600°C, na ausência de oxigénio.

A oxidação do carbono e do hidrogénio realiza-se a temperaturas geralmente acima de 600°C, para cobrir as necessidades térmicas da reacção de redução endotérmica e para destruir os hidrocarbonetos, que se formaram na zona de pirólise. Durante o processo de gaseificação, é produzido um gás, que consiste numa mistura de gases combustíveis ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ) e não combustíveis ( $CO_2$ ,  $N_2$ ).

A gaseificação da biomassa é uma tecnologia muito prometedora, especialmente para a produção de energia. A electricidade fornecida tem um elevado grau de eficiência. Além disso, podem esperar-se emissões mais baixas, relacionadas com o processo, como é o caso da produção de electricidade, por meio de uma combustão directa da biomassa. Por esta razão, tem sido levada a cabo muita investigação, para tentar tornar esta tecnologia disponível em centrais de larga escala. Contudo, existem

muito poucas centrais de gaseificação em operação no mercado e apenas para produção de calor.

Existem particulares dificuldades com a purificação do gás, visto que a biomassa gaseificada mostra um elevado teor de poeiras e, por vezes, quantidades consideráveis de materiais orgânicos condensáveis.

## 3.2 Equipamentos de combustão de Biomassa

### 3.2.1 Equipamentos domésticos

Muitos sistemas de combustão de pequenas dimensões não são projectados para fornecer todo o aquecimento para os edifícios. Contudo, são capazes de desempenhar diversas tarefas de aquecimento para divisões ou áreas dentro dos edifícios.

Existem numerosas alternativas para fornecer os edifícios com aquecimento a partir da madeira. É possível desenvolver não só sistemas de aquecimento central, mas aplicações descentralizadas de lareiras, em combinação com a energia solar e outras fontes de energia.

Existem diferentes tipos de sistemas de combustão de pequenas dimensões, dos quais podem destacar-se os seguintes:

- Lareiras abertas (imagem 24)
- Lareiras fechadas
- Salamandra (imagem 25)
- Fornos a pellets
- Fogões de aquecimento central
- Fornos de cerâmica
- Caldeiras com toros
- Caldeiras com pellets (imagem 26)
- Caldeiras com estilhas
- Caldeiras combinadas



Imagem 24 – Lareira aberta a lenha [26]



Imagem 25 – Salamandra [27]



Imagem 26 – Caldeira a pellets [28]

### 3.2.2 Equipamentos industriais

Como equipamentos industriais podem considerar-se as caldeiras. Os tipos de caldeiras, podem ser classificados de acordo com a utilização prevista, o tipo de fluído gerado e o combustível utilizado. Ter-se-á em conta neste caso o tipo de combustível utilizado, podendo ser sólido, líquido ou gasoso. Uma vez que o presente trabalho

incide sobre a biomassa, aprofunda-se um pouco mais, o conhecimento relativo às caldeiras que mais utilizam combustível sólido.

Podem considerar-se dois grupos principais de caldeiras:

- Caldeiras tipo tubo de fogo/tubos de fumo;
- Caldeiras aquotubulares.

Analisemos então, estes tipos de caldeiras.

### 3.2.2.1 Caldeiras tubos de fumo/tubos de fogo para combustíveis sólidos

Faz-se referência a caldeiras com fornalha equipada com grelha inclinada fixa, que se destina à queima de lenha de grande dimensão (imagem 27); com grelha plana de alimentação inferior por parafuso sem-fim (imagem 28), que se destina à queima de combustível sólido granulado como é o caso das estilhas de madeira ou bagaço de azeitona; com grelha móvel rotativa, normalmente utilizada na queima de carvão granulado (imagem 29) e também com grelha plana fixa, para a queima de carvão (imagem 30); entre outros sistemas de queima de combustíveis sólidos. Estes sistemas podem equipar tanto as caldeiras de tubos de fumo, como caldeiras aquotubulares, produzindo vapor.

As caldeiras do tipo tubo de fumo para combustíveis sólidos, encontram-se representadas nas imagens 27, 28, 29 e 30, são caldeiras onde os gases de combustão circulam por dentro de tubos, aquecendo a água que fica por fora destes.

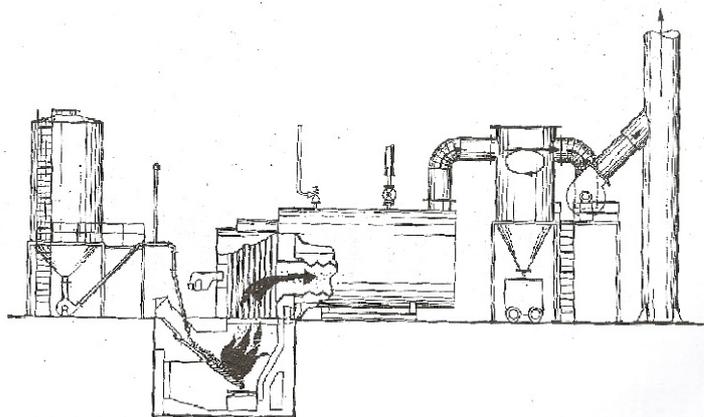
Como fonte de energia utiliza-se um combustível sólido, podendo também existir uma queima mista com queimador de combustível líquido ou gasoso (imagem 27).

O fluido produzido é água quente ou vapor saturado e o número de passagens dos gases de combustão podem ser duas (imagem 28) ou três (imagem 27, 29 e 30).

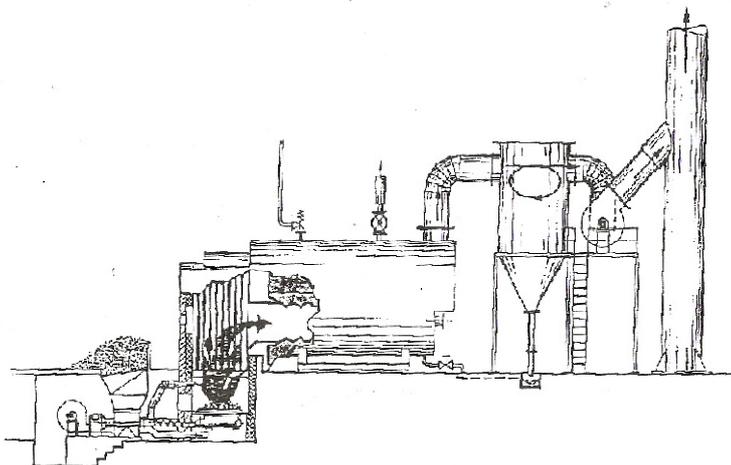
Como tipo de câmara de combustão e equipamento de queima podemos ter:

- Uma fornalha em material refractário, com serpentina superior, de arrefecimento, frontal tubular equipada com grelha fixa inclinada (imagem 27) e tubo de fogo;
- Uma fornalha equipada com grelha plana de alimentação inferior por parafuso sem-fim (imagem 28);

- Tubo de fogo equipado com grelha mecânica plana móvel (imagem 29);
- Fornalha equipada com grelha fixa horizontal (imagem 30).



**Imagem 27 – Esquema de uma caldeira com fornalha com grelha inclinada equipada com ciclone [29]**



**Imagem 28 – Caldeira com grelha de alimentação inferior por parafuso sem-fim, equipada com ciclone [30]**

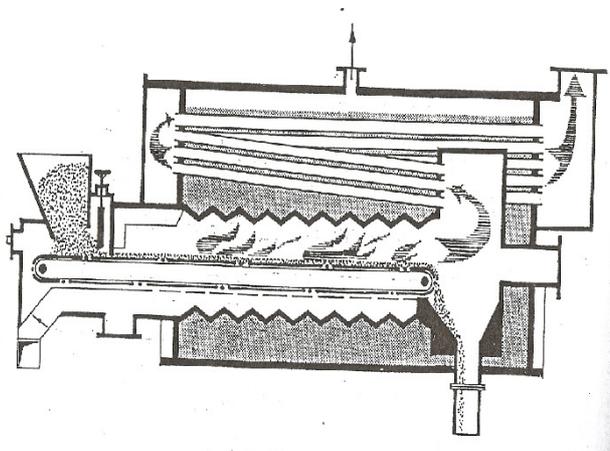


Imagem 29 – Esquema de uma caldeira com grelha móvel rotativa [31]

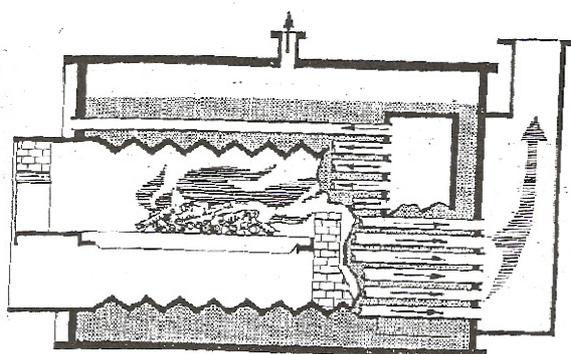


Imagem 30 – Esquema de uma caldeira com grelha plana fixa [32]

A câmara de combustão pode ainda ser interior ou exterior. Fica situada interiormente quando queima combustível líquido ou gasoso (imagem 27 e 29) e situa-se exteriormente quando queima combustível sólido com grelha fixa horizontal (imagem 30) e com queimador de grelha plana de alimentação inferior (imagem 28).

A circulação do fluido a aquecer ou a vaporizar faz-se naturalmente por tubos de fumo diretos e horizontais.

Os materiais de construção utilizados são: para o corpo de pressão, chapa e tubos de aço; para a serpentina de arrefecimento também se utilizam tubos de aço e para a fornalha é utilizado material refractário e isolante.

O isolamento do corpo de pressão é feito através de mantas de lã mineral protegida por chapa galvanizada (possui boas propriedades anticorrosivas e um baixo preço relativamente a outros processos de protecção) ou alumínio e por material isolante (tijolos) na fornalha.

### 3.2.2.2 Caldeiras aquotubulares

Como o próprio nome indica, este tipo de caldeiras é constituída por tubos e no interior desses tubos circula água, água esta que irá ser aquecida até se transformar em vapor saturado, água sobreaquecida ou mesmo vapor sobreaquecido. Os produtos de combustão que vão aquecer estes tubos circulam pelo exterior das paredes ou feixes tubulares.

O material utilizado para a sua construção é fundamentalmente tubos de água em aço. A circulação do fluído a aquecer faz-se naturalmente e os tubos são direitos e verticais. Quanto á câmara de combustão, esta pode ser tubular ou cilíndrica.

As caldeiras aquotubulares mais vulgares destinam-se a grandes produções de vapor e a pressões elevadas. Como as paredes que envolvem os gases são constituídas por tubos, é fácil mudar o seu aspecto, conforme se indica na imagem 31.

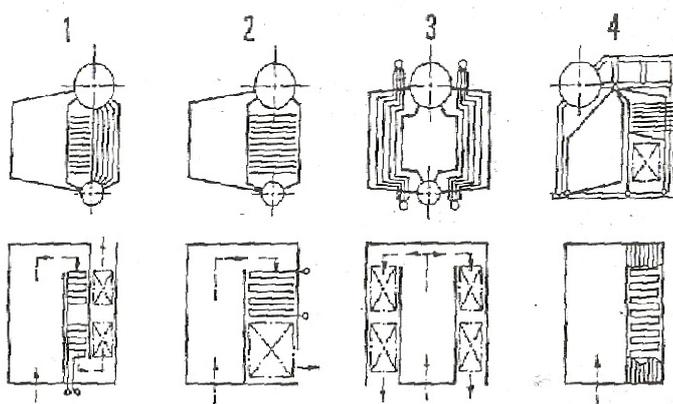
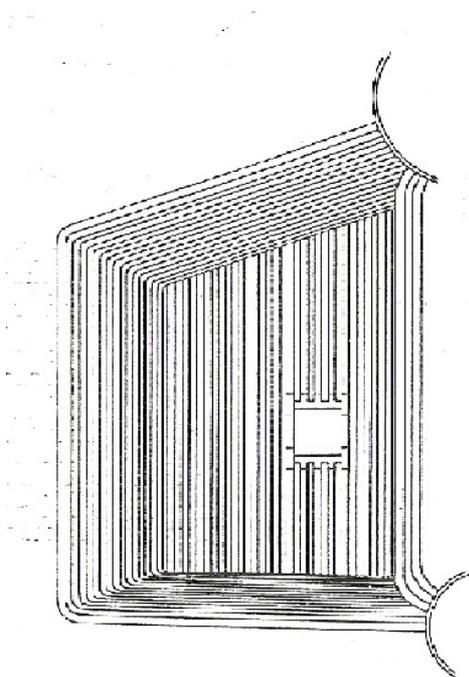


Imagem 31 – Esquemas de diversos tipos de caldeiras aquotubulares em perfil e em planta [33]

Nos quatro exemplos representados em perfil e em planta, a câmara de combustão é inferior, formada por paredes tubulares com formato mais ou menos rectangular imagem 32, com disposição assimétrica nos exemplos 1, 2 e 4, e com disposição simétrica no exemplo 3. Em qualquer dos exemplos as caldeiras encontram-se sujeitas á acção da chama. Relativamente ao número de passagens dos gases, teremos duas passagens nos exemplos 2 e 3 e três passagens nos exemplos 1 e 4.



**Imagem 32 – Esquema de uma câmara de combustão rectangular de uma caldeira aquotubular [34]**

A eficiência das caldeiras pode aumentar, principalmente nas de duas passagens dos gases, com a instalação de um economizador tubular, que se destina normalmente ao aquecimento da água de alimentação, através de troca de calor com os gases de fumo (imagem 33).

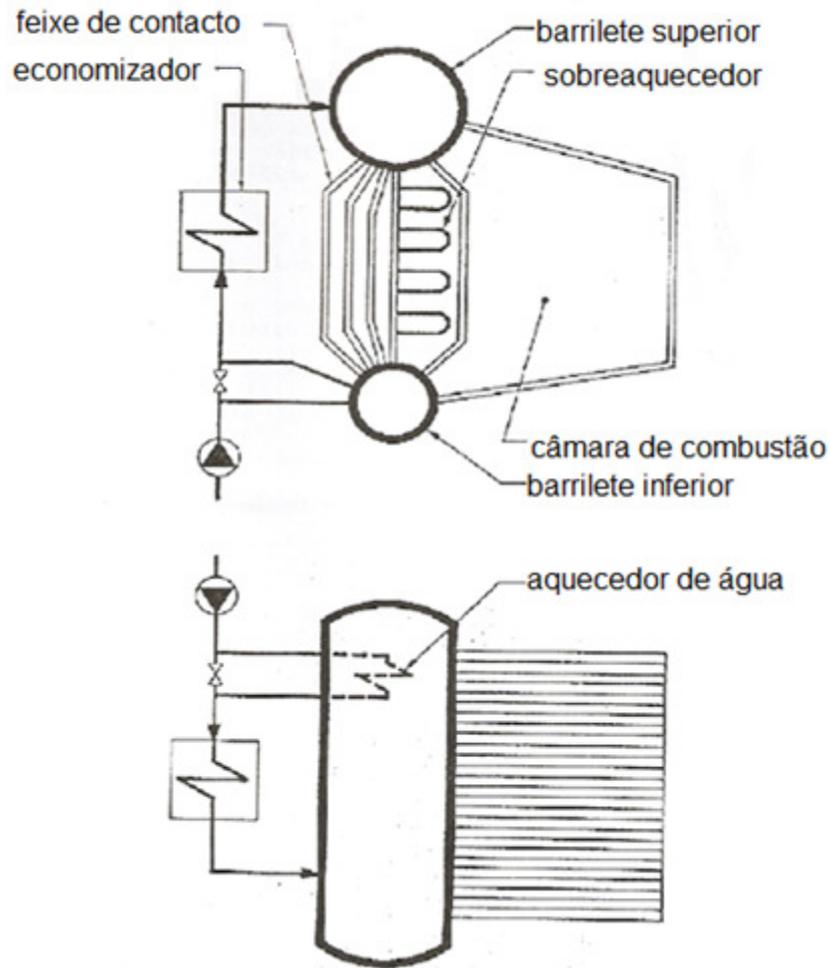
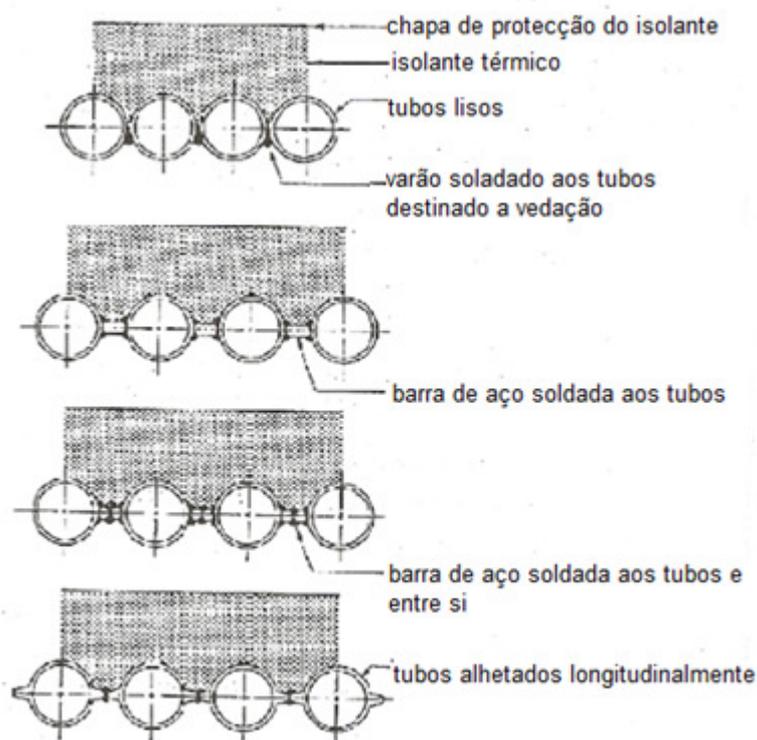


Imagem 33 – Esquema de uma caldeira aquotubular, em perfil e em planta [35]

Como as paredes destas caldeiras são constituídas por tubos, percorridos interiormente por água e exteriormente pelos gases de combustão, tem que ser assegurada a estanqueidade e o isolamento das paredes exteriores da caldeira através de uma das soluções indicadas na imagem 34.



**Imagem 34 – Esquema de soluções possíveis de paredes tubulares [36]**

Para finalizar este tipo de caldeiras, utilizadas em grandes unidades fabris, representa-se na imagem 35, uma caldeira aquotubular, de desenvolvimento vertical, que se destina á queima de um combustível sólido em grelha inclinada, com dispositivo sacudidor, para avanço do combustível sólido, equipado com barrilete superior e colectores inferiores de interligação. A caldeira encontra-se ainda equipada com queimadores de combustível líquido, como alternativa á queima de carvão. Diversos sobreaquecedores, indicam temperatura elevada no vapor produzido. Na saída dos gases situa-se um economizador.

Na imagem que se segue, o número 1 indica a câmara de combustão, 2 o feixe de combustão (sobreaquecedor) e o 3 representa os economizadores.

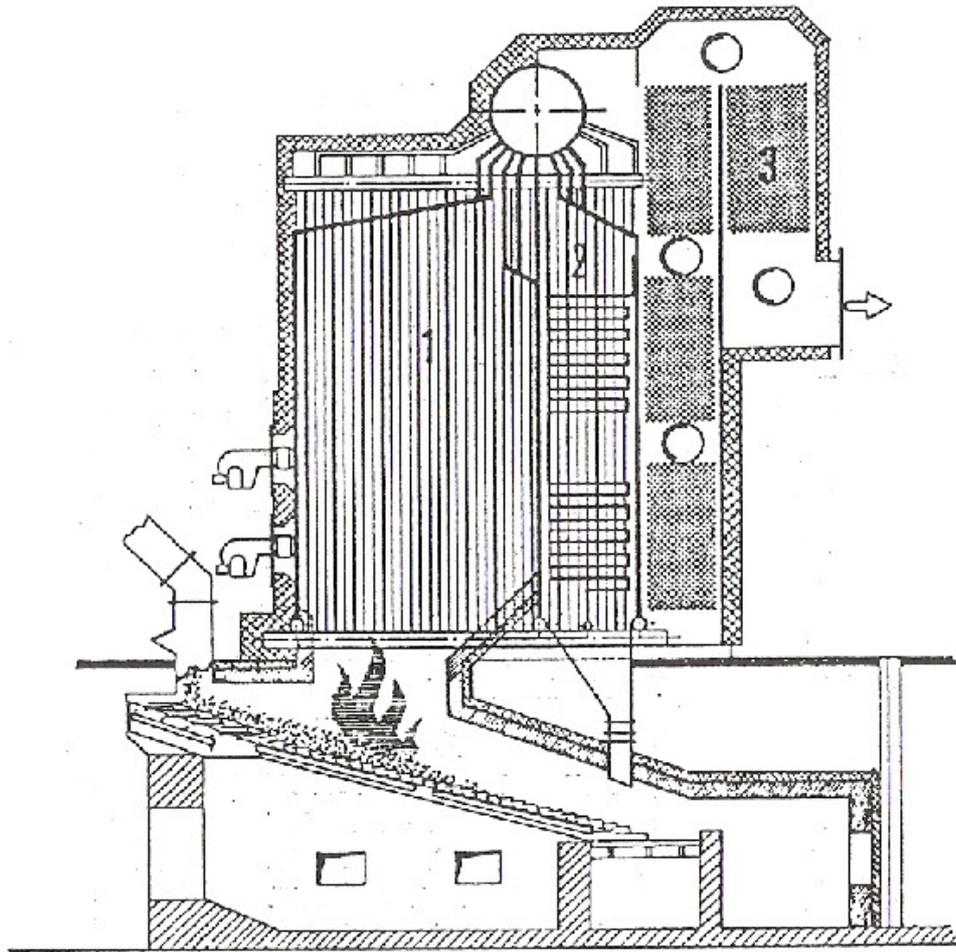


Imagem 35 – Esquema de uma caldeira aquotubular para combustíveis sólidos [37]

# Capítulo IV

## 4 Tratamento de Efluentes Gasosos

Neste capítulo, em primeiro lugar faz-se uma breve revisão dos poluentes atmosféricos.

De seguida, serão abordados os diferentes tipos de despoeiradores. Os despoeiradores são dispositivos que permitem reduzir a quantidade de material particulado lançado para a atmosfera.

### 4.1 Poluentes Atmosféricos

Pode designar-se poluente atmosférico qualquer forma de matéria sólida, líquida ou gasosa e de energia que, quando presente na atmosfera a pode contaminar. Os poluentes atmosféricos podem ser classificados de acordo com:

- Estado Físico: Material Particulado; Gases e Vapores
- Origem: Poluentes Primários (emitidos já na forma de poluentes); Poluentes Secundários (formados na atmosfera por reacções químicas ou fotoquímicas)
- Classe Química: Poluentes Orgânicos e Poluentes Inorgânicos

**Material Particulado**: As partículas sólidas ou líquidas emitidas por fontes de poluição do ar ou mesmo as que se formam na atmosfera, como as partículas de sulfato, são denominadas de material particulado, e quando dispersas no ar formam os chamados aerossóis. O material particulado pode ser classificado de acordo com o método de formação:

- Poeiras: Aerossol de partículas sólidas, geralmente formadas por processos de desintegração mecânica (moagem, britagem, entre outros).
- Fumos: Aerossol de partículas sólidas formadas por condensação ou sublimação de substâncias gasosas originadas da vaporização/sublimação de sólidos. A formação dos fumos é normalmente acompanhada de reacções químicas.
- Névoas: Partículas líquidas produzidas por condensação ou por dispersão de um líquido.

## 4.2 Controlo da poluição atmosférica

As medidas mais utilizadas para controlar os diversos tipos de poluição atmosférica podem ser as medidas indirectas e as medidas directas.

**Medidas Indirectas:** acções que visam a eliminação, redução ou afastamento dos poluentes.

- Planeamento urbano e medidas correlacionadas (melhor distribuição espacial das fontes de poluição, ...)
- Diluição através de chaminés altas (visando reduzir a concentração dos poluentes ao nível do solo)
- Medidas para impedir a geração dos poluentes (adoptando medidas como substituição de combustíveis, matérias primas, e reagentes dos processos)
- Medidas para reduzir a geração dos poluentes (manutenção adequada dos equipamentos produtivos, ...).

**Medidas Directas:** a sua finalidade é reduzir a quantidade de poluentes lançados, através da instalação de equipamentos de controlo.

- Classificação dos equipamentos de controlo de poluição do ar (na escolha os poluentes devem ser classificados em função do estado físico, e em seguida a classificação envolve diversos parâmetros como mecanismo de controle, ...)
- Selecção de equipamentos de controlo de poluição do ar (a selecção do equipamento de controlo a ser utilizado deve ser precedida de análise de viabilidade técnica, económica e de outros factores específicos para a fonte em questão).

### 4.3 Selecção dos Equipamentos de controlo da poluição do ar

A característica principal que influencia a selecção do equipamento, é a eficiência de recolha necessária para enquadrar a emissão da fonte nos padrões exigidos. A eficiência da recolha, para todos os tipos de colectores de material particulado, depende da distribuição do tamanho das partículas presentes no gás a ser tratado.

Existem diversos factores envolvidos na escolha de um sistema de controlo de poluição do ar, podendo referir-se os seguintes:

- A empresa deve descrever a fonte a ser controlada, conhecer as exigências legais e posicionar-se firmemente quanto as decisões que serão tomadas
- Caracterizar a emissão (tipo de poluentes emitidos, estimativa de emissão, características físicas e químicas, ...)
- Avaliar as possíveis alternativas de redução de emissão
- Listar os métodos de controlo possíveis e as suas respectivas reduções, verificar se há restrições para aplicar algum destes métodos, consultar literatura de apoio
- Fazer uma selecção preliminar com as alternativas mais convenientes;
- Realizar uma análise económica, estimando os custos envolvidos para cada alternativa
- Para a selecção é necessária a comparação entre as alternativas seleccionadas previamente do ponto de vista técnico e económico, para decidir qual será a mais conveniente para a fonte de emissão e para a empresa.

#### 4.4 Equipamentos de tratamento de efluentes gasosos

Os sistemas de controlo da poluição atmosférica são sistemas utilizados na indústria, capazes de remover as partículas sólidas e gases do ar provenientes de fontes poluidoras, com o objectivo de o libertar na atmosfera devidamente tratado, conforme as normas ambientais. Os equipamentos com essa finalidade podem ser designados de despoiradores. A tabela 4 representa os diferentes tipos de colectores e a classe de tamanhos em que cada um deles consegue operar.

Tabela 4 – Tipos de Filtros Industriais [38]

Dimensão	1,0 mm	100 microns	10 microns	1 micron	0,1 micron	0,01 $\mu$
<b>Principais</b>	← Areia →	← Poeiras Atmosféricas →			← Fumaça De Cigarro →	
<b>Tipos de Poluentes</b>	← Chuva / Neblina / Nevoeiro →			← Fumos De Solda →		
	← Pólen →	← Bactérias →	← Pó de Cimento →	← Névoas De Oleo →		
		← Fungos →		← Oxido De Metais →		
		← Pó de Carvão →	← Névoas de NOx e SOx →			
	← Areia de Fundição →		← Negro de Fumo →		← Virus →	
<b>Identificação</b>	← Olho Nu →	← Microscópio →		← Microscópio Eletrónico →		
<b>Faixa Prática de Trabalho dos Principais Tipos de Colectores</b>	Coletor Gravitacional	Ciclones	Multiciclones	Lavadores de Gases	Filtros de Mangas	Filtros Eletrostáticos
						Filtros Absolutos

De entre os diversos tipos de despoiradores podem destacar-se três tipos principais: precipitadores electrostáticos, ciclones e filtros de mangas.

#### 4.4.1 Precipitadores Electrostáticos

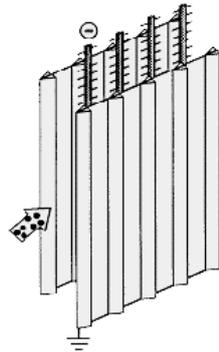
Os precipitadores electrostáticos são equipamentos industriais, utilizados na colheita de material sob a forma de partículas (imagem 27). Carregam electrostaticamente as partículas e depois captam-nas por atracção ou repulsão electromagnética.

Este equipamento remove até 99,5% da massa total de partículas. O precipitador cria um campo electrostático que carrega as partículas que estão presentes nos gases, as quais são posteriormente repelidas ou atraídas por placas electrizadas, ficando presas a elas.



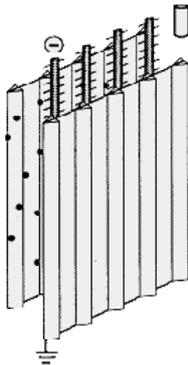
**Imagem 36 – Precipitador Electrostático [39]**

Os precipitadores electrostáticos funcionam da seguinte forma: o gás proveniente do processo entra no precipitador trazendo consigo partículas suspensas, as quais passam pelos eléctrodos de descarga de alta voltagem. Os eléctrodos, ionizam o gás com carga negativa (imagem 28).



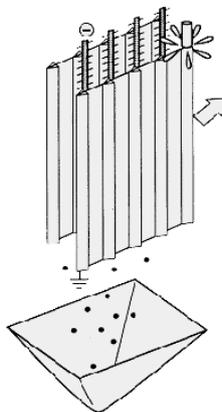
**Imagem 37 – Carregamento das partículas [40]**

De seguida, o gás carregado negativamente em volta de cada eléctrodo actua sobre as partículas, tornando-as também negativas, as quais são atraídas para os eléctrodos de polaridade oposta, como por exemplo, as placas colectoras.



**Imagem 38 – Adesão das partículas às placas colectoras [41]**

As partículas, com carga negativa, aderem a placa colectora (imagem 29). Os batedores têm a função de descolar o aglomerado de partículas, que caem, para remoção (imagem 30).



**Imagem 39 – Batimento das partículas [42]**

Os precipitadores electrostáticos possuem algumas vantagens tais como:

- Alta eficiência na colheita de partículas
- Baixa perda de carga
- Baixo custo operacional
- Pode remover partículas sólidas e líquidas que são difíceis de remover com outros equipamentos
- Possui poucos problemas de manutenção e operação
- Podem funcionar continuamente por longos períodos e numa faixa ampla de pressões positivas ou negativas
- Possui uma vida útil longa, podendo atingir mais de 20 anos.

Possui ainda algumas desvantagens, podendo destacar-se o seguinte:

- Alto investimento inicial
- Requer um grande espaço para a sua instalação
- Apresenta riscos de explosão quando processa partículas ou gases inflamáveis ou explosivos
- Exige medidas especiais de segurança contra alta voltagem
- É muito sensível a variações de caudal, temperaturas e humidade
- Exige pessoal qualificado para a sua manutenção.

#### 4.4.2 Ciclones e multiciclones

Os ciclones são separadores gás-sólido (despoeiradores) muito usados na prática industrial para remover partículas sólidas ou líquidas presentes nos efluentes gasosos. A sua eficiência é boa para partículas relativamente grosseiras e pesadas (maior que 10 $\mu$ m) mas limitada para poeiras e aerossóis muito finos.

Estes colectores de partículas para além da boa eficiência na remoção de partículas grossas, são caracterizados pelo seu baixo custo de capital, moderados custos operatórios e simplicidade de operação e manutenção. Podem ser usados em condições extremas de temperatura e pressão. Embora estes equipamentos com grandes diâmetros

não sejam muito eficientes para partículas inferiores a  $5\mu\text{m}$ , o uso de multiciclones (miniciclones) em paralelo, permite atingir diâmetros de corte da ordem de  $1\mu\text{m}$  (entendendo-se por diâmetro de corte, o tamanho da partícula para o qual a eficiência de colecta é de 50%).

Ao longo dos anos foram desenvolvidas várias teorias sobre a colecta da material particulado por ciclones partindo da fórmula do diâmetro de corte de Lapple, da abordagem de partícula estática por Barth até às teorias semi-empíricas de Leith e Licht, abordagem fundamental de Dietz e as teorias de difusividade finita de Mother e Loffler e de Li e Wang.

Foram feitos vários avanços na tecnologia de ciclones. Actualmente um modelo de eficiência deve: englobar a geometria do ciclone, reconhecer a importância da mistura turbulenta, fornecer uma distribuição dos tempos de residência do gás, não assumir mistura efectiva nas regiões de fluxo e ainda permitir a troca de partículas entre as regiões de fluxo.

Os ciclones são aplicados no pré-despoeiramento (muitas vezes instalados a montante de um equipamento mais eficiente, como por exemplo filtros de mangas, o que facilita a remoção de partículas mais pesadas e de maiores dimensões), para controlo da carga particulada grosseira transportada pelos efluentes gasosos. Por sua vez os multiciclones são utilizados em centrais térmicas a fuelóleo e a carvão, em incineradores de resíduos, etc.

### ➤ Tipos de ciclones

Os ciclones podem ser classificados de diferentes formas:

- Quanto ao tipo de entrada: tangencial, axial, helicoidal e espiral (imagem 40).

Os ciclones de entrada tangencial impõem uma maior perda de carga relativamente aos de entrada axial, mas são mais eficientes para o mesmo diâmetro. Quanto aos tipos de entrada helicoidal e espiral, são menos utilizados por serem menos eficientes.

- Quanto ao tipo de fluxo: invertido ou simples.

No ciclone de fluxo invertido (entrada tangencial ou espiral) o gás entra pelo topo e desce em espiral, invertendo o seu sentido antes de atingir a base. Deste modo, o gás limpo sai de novo pelo topo, enquanto que as partículas são recolhidas na base em

reservatórios ou tremonhas (espécie de reservatório em forma de pirâmide quadrangular truncada e invertida). Este tipo de ciclone é o que apresenta o design mais comum.

No ciclone de fluxo simples (entrada helicoidal) o gás entra pelo topo e tanto o gás limpo como as partículas recolhidas saem pela base.

- Quanto á eficiência: alta eficiência ou simples.

Os ciclones de alta eficiência, apresentam pequenos diâmetros com cones muito compridos e perdas de carga acentuadas; são utilizados para a colecta de partículas entre 5 a 10 $\mu$ m. Pelo facto de serem mais pequenos permite que a sua concepção seja mais barata, no entanto os custos operatórios são superiores em termos energéticos, devido ao aumento da perda de carga com a diminuição do diâmetro do ciclone.

Por outro lado, os ciclones simples apresentam grande diâmetro (0,75m a 1,5m), apresentando deste modo pequenas perdas de carga, baixa eficiência para pequenas partículas e funcionam com grandes caudais.

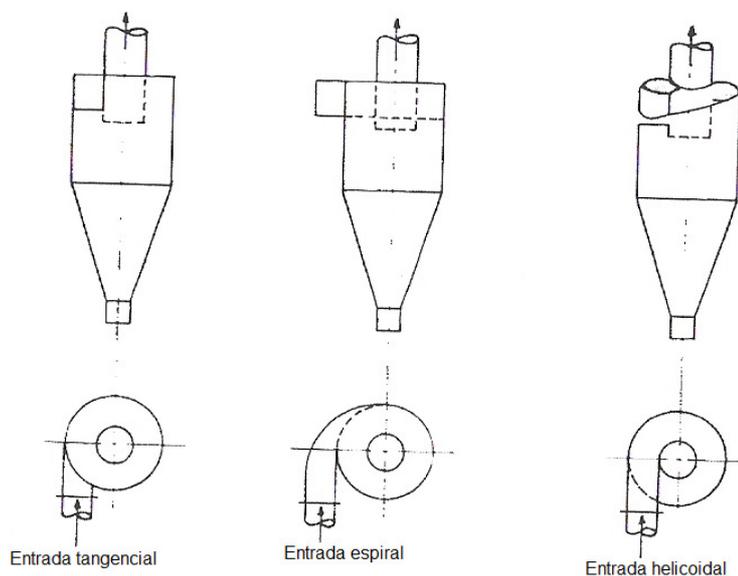
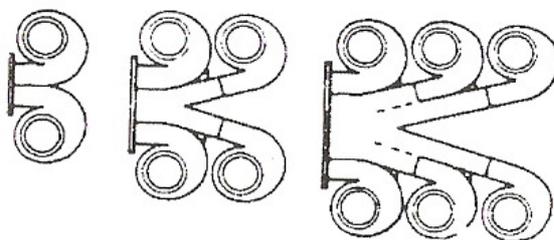


Imagem 40 – Ciclones de fluxo invertido [43]

- Quanto à associação: paralelo ou em série.

A associação em paralelo (imagem 41) utiliza-se para grandes caudais e grandes eficiências, com uma entrada e uma saída. Os multiciclones são um conjunto de ciclones de pequeno diâmetro (entre os 15 e os 25cm) que funcionam em paralelo e têm uma entrada e uma saída comum. Esta associação permite atingir eficiências de remoção mais elevadas (cerca de 90% para partículas entre 5 a 10 $\mu$ m).



**Imagem 41 – Associação de ciclones em paralelo (multiciclone) [44]**

A associação em série não é tão comum e é utilizada quando se tem partículas grosseiras e finas.

Para se removerem as partículas finas, a velocidade de entrada deve ser elevada, deste modo as partículas grosseiras ficam sujeitas a uma grande aceleração centrífuga, o que faz com que choquem com as paredes do ciclone com uma grande quantidade de movimento provocando erosão. Para que este problema não se verifique deve construir-se um ciclone a montante com um diâmetro maior, onde apenas são removidas as partículas mais grosseiras, usando-se um ciclone mais eficiente de seguida para remover as partículas mais finas.

As características gerais dos ciclones simples e dos multiciclones encontram-se descritas na tabela 5.

Tabela 5 – Comparação entre ciclones simples e multiciclones [45]

Características	Ciclones	Multiciclones
Eficiência	Elevada acima de 10 a 30 $\mu$ m	Elevada acima de 4 a 8 $\mu$ m
Utilização	Grande simplicidade	Grande simplicidade
Custo de investimento	Muito baixo	Baixo
Custo de exploração	Muito baixo	Baixo a médio
Manutenção	Muito reduzida	Reduzida

### ➤ Descrição do Ciclone e do seu funcionamento

Os ciclones mais utilizados são os de entrada tangencial de fluxo invertido.

Fisicamente, um ciclone é constituído por um corpo cilíndrico com uma entrada tangencial, ao qual é soldada uma base cónica com uma abertura inferior para a descarga de partículas recolhidas e uma abertura na parte superior do cilindro por onde desce uma conduta para a saída do ar limpo.

O escoamento do gás através do ciclone começa pela entrada tangencial no corpo cilíndrico, onde o gás é forçado a descrever uma trajectória em espiral, originando forças centrífugas que actuam sobre as partículas, sendo obrigada a contrair na zona cónica inferior, obrigando ainda o fluxo a inverter o seu sentido, saindo o ar limpo pela abertura superior. As partículas que são atiradas contra a parede pela força centrífuga, têm uma trajectória descendente pela força da gravidade, e posteriormente são descarregadas do ciclone através da abertura inferior localizada na parte cónica, através de uma válvula rotativa (imagem 42).

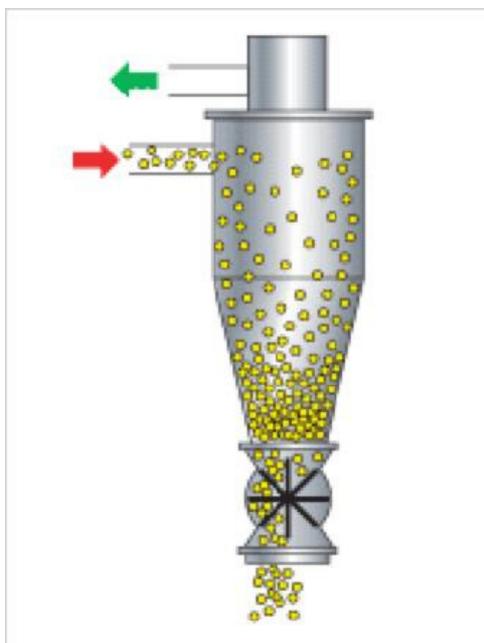


Imagem 42 – Trajecto efectuado pelas partículas no ciclone [46]

O gás dentro do ciclone de fluxo invertido geralmente descreve um movimento em duplo vórtice; ou seja: um descendente, localizado numa posição exterior, e outro ascendente, interior, que corresponde á trajectória em espiral do gás limpo. Este fenómeno pode ser observado na imagem 43.

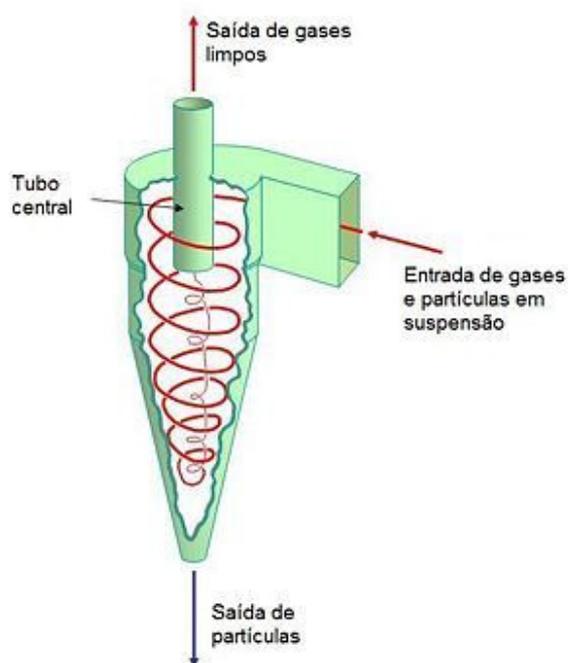


Imagem 43 – Escoamento gasoso através de um ciclone de entrada tangencial e de fluxo invertido [47]

➤ **Manutenção dos ciclones**

Como os ciclones são de construção simples, não apresentam grandes problemas durante o funcionamento. Normalmente as causas de problemas são:

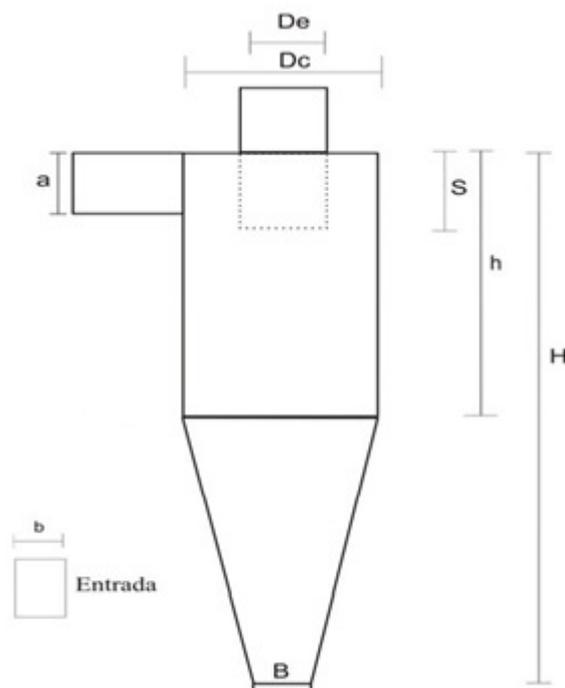
- Incrustação nas paredes;
- Corrosão no caso de condensação de gases ácidos;
- Incrustação nas paredes;
- Abrasão devida a velocidades elevadas.

Quanto ao cuidado a ter com os ciclones, este consiste essencialmente na medida da:

- Concentração de poeiras;
- Perda de carga;
- Temperatura dos gases.

➤ **Configuração do ciclone**

Um ciclone de fluxo invertido e de entrada tangencial é caracterizado pelas dimensões que estão indicadas na ilustração 1.



**Ilustração 1 – Constituição de um ciclone [48]**

Onde:

- D ou Dc - diâmetro do corpo cilíndrico;
- a - altura da secção rectangular da entrada de gás;
- b – largura da secção rectangular de entrada do gás;
- h – altura do corpo cilíndrico;
- De – diâmetro da conduta de saída de gás limpo;
- S – altura de conduta de saída de gás limpo;
- H – altura total do ciclone;
- B – diâmetro da conduta de saída de partículas.

A sua configuração consiste num conjunto de parâmetros adimensionais, os quais se indicam a seguir.

$$K_a = \frac{a}{D} \quad (\text{Eq. 1}), [49]; \quad K_b = \frac{b}{D} \quad (\text{Eq. 2}), [49];$$

$$K_s = \frac{S}{D} \quad (\text{Eq. 3}), [49]; \quad K_{De} = \frac{De}{D} \quad (\text{Eq. 4}), [49];$$

$$K_h = \frac{h}{D} \quad (\text{Eq. 5}), [49]; \quad K_H = \frac{H}{D} \quad (\text{Eq. 6}), [49];$$

$$K_B = \frac{B}{D} \quad (\text{Eq. 7}), [49].$$

O valor para os parâmetros anteriores varia consoante a configuração do ciclone. Parâmetros estes que se encontram representados um pouco mais á frente na tabela 9.

### ➤ **Condições de funcionamento**

Existe um mínimo de especificações operacionais que têm que se verificar, para haver um funcionamento eficiente e económico do ciclone, e que têm a ver com as condições hidrodinâmicas:

- $15 < u_0 < 30$  m/s;
- $2 < \Delta p < 1010$ cm H<sub>2</sub>O, para ciclones simples;
- $10 < \Delta p < 30$ cm H<sub>2</sub>O, para multiciclones ou ciclones de alta eficiência.

Desta forma limitam a velocidade de entrada ( $u_0$ ) no ciclone e a perda de carga ( $\Delta p$ ) através dele.

A perda de carga do fluído através do ciclone tem uma grande importância, pois condiciona os custos energéticos de ventilação e pode condicionar a própria eficiência de separação.

Relativamente á velocidade de entrada, se esta for superior a 30 m/s, o aumento da turbulência do ciclone podem levar a uma eficiência menor, e por sua vez a perda de carga e a erosão do ciclone aumentam. O ciclone não consegue estabelecer um vórtice estável para velocidades inferiores a 15 m/s. É ainda de salientar que estas dimensões são referentes a ciclones de tamanho industrial.

Para miniciclones (diâmetros com alguns centímetros), a velocidade não tem que ser tão elevada, uma vez que o diâmetro é menor, e a força centrífuga é inversamente proporcional ao diâmetro (quando o diâmetro diminui, a força centrífuga aumenta). A velocidade de entrada que é necessária para se atingir uma determinada eficiência é tanto mais baixa quanto menor for o diâmetro do ciclone.

Em termos de cálculo, o dimensionamento dum ciclone consiste em determinar a eficiência do ciclone, partindo dos parâmetros geométricos impostos e vice-versa ou então uma outra forma é impor uma determinada velocidade de entrada, calcular a secção de entrada ( $a \times b$ ) de acordo com a equação 8, e, após a escolha da configuração pode calcular-se o diâmetro do ciclone. O valor desse diâmetro pode ser aperfeiçoado, para se obter a eficiência pretendida.

$$Gv = A \times u_0 \leftrightarrow A = \frac{Gv}{u_0} \quad (\text{Eq. 8}), [50]$$

Onde:

$Gv$  – Caudal;

$A$  – Área da secção de entrada;

$u_0$  - Velocidade tangencial ou velocidade de entrada.

### ➤ **Eficiência do ciclone**

A eficiência de um ciclone ( $\eta(dp)$ ), ou eficiência de separação de partículas, é definida como a fracção de partículas de um dado tamanho ( $dp$ ) retida pelo ciclone.

Caso se esteja longe da eficiência pretendida, deve-se diminuir com moderação o diâmetro do ciclone, ou optar por uma configuração mais eficiente, ou caso tenhamos um elevado caudal, deve ser usado um multiciclone. Deve optar-se pela hipótese de

construção e operação mais económica. Evidencia-se ainda, que, a eficiência de um ciclone aumenta com o aumento da força centrífuga; esta força aumenta com a diminuição do diâmetro do ciclone e com o aumento da velocidade de entrada do gás.

Pode ainda dizer-se, que, a eficiência de despoeiramento depende da configuração do ciclone e aumenta com o comprimento do corpo do ciclone, a rugosidade das paredes e o número de rotações do gás, e diminui com o aumento da largura de entrada. A eficiência é ainda influenciada pelas características do sistema gás/partícula, aumentando com a densidade, a concentração e o diâmetro das partículas e diminuindo com o aumento da viscosidade e da densidade do gás.

Para estabelecer a curva de eficiência pode ser seguidos diferentes modelos teóricos.

### ➤ Dimensionamento e Modelização

O dimensionamento de ciclones, é um processo baseado na modelização do escoamento e na remoção de partículas por despoeiradores ciclónicos, passa pela escolha de uma configuração e posterior cálculo do diâmetro principal do ciclone, conhecendo as variáveis operacionais e a eficiência pretendida.

O desempenho de um ciclone pode ser avaliado através da perda de carga e da eficiência de separação específica, convencionalmente expressa em termos da função que relaciona a eficiência de separação ou recolha com os tamanhos das partículas.

Relativamente á forma e tamanho dos ciclones são observadas diferenças significativas, pelo que no dimensionamento existem vários objectivos a considerar:

- Maximizar a eficiência ( $K$ ) – modelo SWIFT;
- Minimizar a perda de carga ( $N_H$ ) – modelo simples;
- Maximizar a eficiência, minimizando em simultâneo, a perda de carga ( $K$ ,  $N_H$ ) – modelo Stairmand.

O dimensionamento de um ciclone (ou de um multiciclone), consiste em relacionar um conjunto de parâmetros de entrada com a eficiência de remoção a atingir.

Os principais parâmetros de entrada são:

- Parâmetros de configuração:  $K_a$ ,  $K_b$ ,  $K_{De}$ ,  $K_S$ ,  $K_h$ ,  $K_H$ ,  $K_B$ ;
- Propriedades físicas das partículas: massa volúmica ( $\rho_p$ ), concentração ( $C_0$ ), distribuição de tamanhos de entrada ( $G_0$ );

- Propriedades físicas do gás: massa volúmica ( $\rho_G$ ), viscosidade ( $\mu_G$ ), temperatura (K), pressão (P), caudal volumétrico actual ( $G_v$  ( $m^3/s$ )).

Os modelos de cálculo das dimensões e da eficiência de ciclones são vários, alguns dos quais têm vindo a ser sujeitos a alterações. Na realização deste trabalho apenas se teve em conta o modelo de Lapple (1951), por ser o mais simples para o cálculo da eficiência.

#### ❖ Modelo de Lapple

O modelo Lapple conhecido também como o modelo do diâmetro de corte é um modelo simples de eficiência. Para a determinação a curva de eficiência (Imagem30). É necessário conhecer o diâmetro de corte ( $d_{p50}$ ), em micrómetros, isto é, o diâmetro da partícula que é capturada com uma eficiência de 50%, que pode ser determinada através da equação 9, onde  $N_e$  é o número de rotações do gás efectivos dentro do ciclone, (cerca de 5 num ciclone de elevada eficiência podendo variar de 0.5 a 10).  $N_e$  pode ser determinado a partir das dimensões do ciclone, através da equação 10.

$$d_{p50} = 10^6 \sqrt{\frac{9\mu_G b}{2\pi N_e U_0 (\rho_p - \rho_G)}} \quad (\text{Eq. 9}), [51]$$

$$N_e \cong \frac{1}{a} \left( h + \frac{H-h}{2} \right) \quad (\text{Eq. 10}), [52]$$

A curva de eficiência pode ser representada pela equação 11.

$$\eta(dp) = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{dp_{50}}{dp}\right)^2\right)} \quad (\text{Eq. 11}), [53]$$

#### 4.4.3 Filtros de Mangas

O processo da filtração de efluentes gasosos permite a separação a seco das partículas, através de uma estrutura constituída por vários obstáculos individuais num suporte poroso.

Especialmente as partículas maiores, são fixadas aos obstáculos pelos vários mecanismos de captura aerodinâmica, criando desta forma um depósito, que após a sua constituição, é o principal meio de colecta. Este depósito necessita de ser removido após

atingir uma determinada espessura, pois passa a impor perdas de carga elevadas, levando a desnecessários e grandes gastos energéticos.

Existem vários sistemas de filtração:

- Fibras localizadas ao acaso sobre um suporte poroso formando leitos de fibras;
- Material granular em leitos fixos ou móveis;
- Fibras intercaladas em forma de saco, incluindo entre outros os filtros de mangas.

Os sistemas de filtração industrial mais usados são, sem dúvida, os que são constituídos por fibras intercaladas.

### ➤ **Considerações gerais**

Um filtro de mangas é um conjunto de elementos idênticos que funcionam em paralelo (imagem 44): as mangas ou sacos. Uma manga é um saco tubular, que pode possuir ou não um suporte interior em malha metálica, conforme o modo como a corrente gasosa se movimenta: de fora para dentro (filtro em depressão) ou de dentro para fora (filtros de pressão), retendo as partículas na parte externa ou interna, respectivamente.



**Imagem 44– Filtros de Mangas [54]**

Após algum tempo de funcionamento forma-se um bolo de filtração que provoca o aumento da perda de carga. Após se ter atingido um valor considerado máximo, o filtro deve ser limpo. Os processos de limpeza incluem o batimento mecânico, o fluxo

de ar em sentido inverso através das mangas e a descolmatação pneumática, para filtros com fluxo de fora para dentro; os processos mais modernos não necessitam de interromper a filtração para ocorrer a descolmatação. Enquanto o filtro é novo, tem dificuldade em reter partículas, e necessita por isso de passar por alguns ciclos de filtração-limpeza, até se tornar um verdadeiro meio filtrante.

As dimensões das mangas variam bastante, no máximo possuem 30 cm de diâmetro e 10 m de altura, para os filtros de pressão. Na prática um filtro é constituído por várias mangas, dispostas verticalmente dentro de uma caixa, funcionando em paralelo, podendo ser observado na imagem 45.

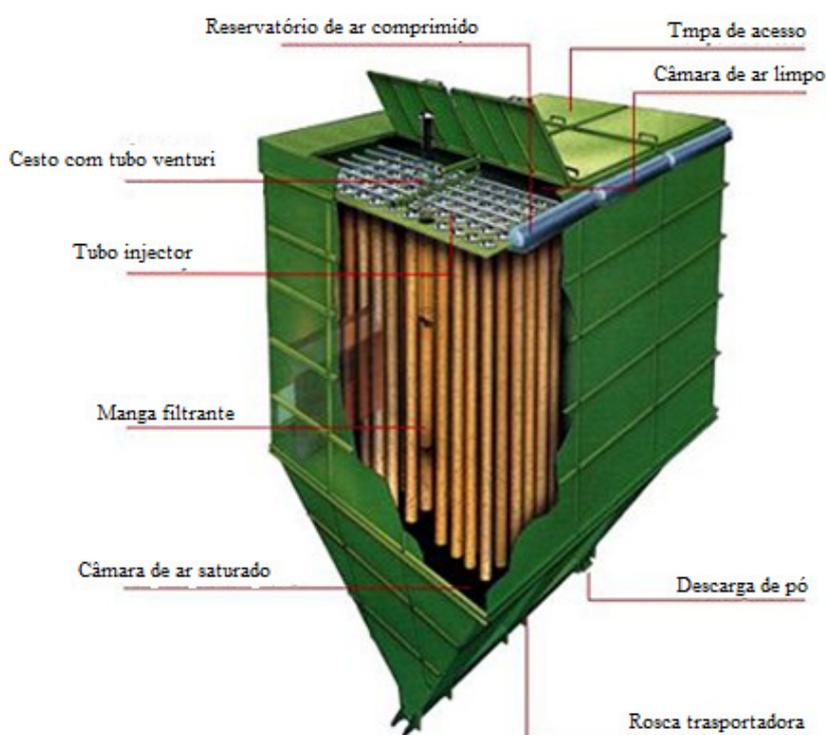


Imagem 45 – Constituição da parte interior de um filtro de mangas [55]

A natureza das fibras usadas no tecido das mangas depende fundamentalmente da temperatura e da composição do gás (tabela 6). Existem vários tipos de tratamento que podem ser aplicados às fibras nomeadamente: burnimento para facilitar o desprendimento do bolo de filtração, revestimento com tensoactivos hidrofóbicos, mistura com fios de palha-de-aço para facilitar a descarga de electricidade estática, etc...

As fibras que compõem as mangas podem ser intercaladas formando tecidos, ou dispostas ao acaso sobre uma matriz ligeira de fibras intercaladas.

Tabela 6 – Propriedades das fibras utilizadas nos filtros de mangas [56]

	Fibras Naturais		Fibras sintéticas					Fibra mineral
	Algodão	Lã	Polipropileno	Tergal	Dralon	Nomex	Teflon	Vidro
<b>Temperatura limite de Utilização</b>	80°C	93°C	90°C	150°C em atmosfera seca	140°C	190°C	260°C	275°C
<b>Resistência aos ácidos</b>	Fraca	Média	Excelente	Boa	Muito Boa	Boa	Excelente	Boa
<b>Resistência aos alcalis ou bases</b>	Boa	Fraca	Excelente	Boa	Boa	Muito Boa	Excelente	Boa
<b>Resistência ao abrasão</b>	Muito Boa	Média	Muito Boa	Excelente	Média	Boa	Boa	Muito Boa
<b>Particularidades</b>	Económica Utilização Limitada	Elevada eficácia de depuração	Utilização Limitada Temperatura	Desaconselhado em gases húmidos	Utilização em gás húmido e quente	Para temperatura elevada	Caro	Tecido Frágil

Define-se a velocidade superficial do gás (equação 12), como o quociente entre o caudal volúmico ( $G_V$ ) e a área total da superfície de colecta ( $n\pi DH$ ), ou seja:

$$u_0 = \frac{G_V}{n\pi DH} \quad (\text{Eq. 12}), [57]$$

Onde:

$n$  – número de mangas;

$D$  – diâmetro das mangas;

$H$  – altura de cada manga;

Por outro lado a área de filtração é dada por:

$$S = n\pi DH = \frac{G_V}{u_0} \quad (\text{Eq. 13}), [58]$$

Onde:

$S$  – Área de filtração;

$n\pi DH$  – Área total da superfície de colecta;

$G_V$  – Caudal volúmico;

$u_0$  – Velocidade superficial do gás.

A velocidade superficial do gás deve estar compreendida entre 1 e 2 cm/s em filtros sobre pressão e de entre 3 e 6 cm/s nos filtros em depressão.

A perda de carga que se observa num filtro de mangas tem três componentes: a perda de carga provocada pela fibra, a perda de carga adicional provocada pelas partículas que compõem o depósito residual correspondente a um filtro usado e descolmatado ( $\Delta p$ ) e finalmente a perda de carga crescente provocada pela acumulação do bolo de filtração decorrente da operação ( $\Delta p_f$ ). A perda de carga máxima deverá estar compreendida entre 12 e 20cm  $H_2O$ . A perda de carga aumenta com o aumento da concentração das partículas e com o tempo de filtração. Velocidades elevadas de filtração tendem a compactar mais o bolo, o que provoca um aumento mais rápido da perda de carga, o que requer uma acção de descolmatação mais frequente e origina um desgaste mais rápido das mangas.

### ➤ **Eficiência e Modelização**

A principal característica dos filtros de mangas é a sua grande eficiência. As concentrações das partículas á saídas são de cerca de 20 a 30 mg/Nm<sup>3</sup> (miligrama por metro cúbico em condições normais) em regime normal, respondendo assim às normas mais severas em vigor.

Apesar de tudo, constata-se que os fenómenos fundamentais na filtração por filtro de mangas se encontram ainda mal esclarecidos, continuando-se a recorrer aos mecanismos clássico de crivagem, atracção electrostática, entre outras, para validar os modelos.

Em regime permanente a eficiência de remoção de partículas de uma manga varia ao longo do ciclo de operação. A penetração de poeira depende directamente da velocidade superficial sendo relativamente independente das dimensões das partículas na alimentação, decrescendo fortemente após a limpeza, aumentando gradualmente com a espessura do bolo de filtração.

### ➤ **Manutenção e Funcionamento**

O filtro funciona numa gama de temperaturas relativamente reduzida: o valor máximo é ditado pela natureza das fibras e o valor mínimo pelo problema de colmatação. Deve medir-se o caudal e a perda de carga, vigiando atentamente o seu comportamento.

O filtro deve poder oferecer a possibilidade de substituir as mangas com facilidade. O período de vida das mangas é de cerca de dois anos e o seu custo corresponde a cerca de 10 a 15% do preço do despoeirador.

### ➤ **Dimensionamento do Filtro de Mangas**

O dimensionamento e o estabelecimento das condições de operação de um filtro de mangas, de uma forma simples, passa por: seleccionar a natureza das fibras; avaliar a necessidade de condicionar a temperatura e a humidade do efluente; escolher a técnica de limpeza; calcular a área de filtração necessária e a duração dos ciclos de operação.

#### ❖ **Seleção do tecido (fibra)**

O primeiro passo no dimensionamento de um filtro de mangas consiste em seleccionar o tipo de fibras que irá constituir as mangas. Esta selecção deve ser feita tendo em conta os seguintes factores:

- Capacidade do tecido para colectar partículas de poeira;

- Capacidade para resistir a efeitos corrosivos e erosivos do gás e poeira;
- Capacidade para resistir a temperaturas elevadas;
- Adequada resistência mecânica;
- Custo moderado, etc.

A temperatura e a humidade do gás são as características mais importantes do efluente para o efeito de selecção do tipo de fibra mais adequado. Cada tecido tem uma temperatura máxima para a qual pode ser utilizado; assim, antes do filtro, é muitas vezes necessário instalar um sistema de arrefecimento de gases.

### ❖ **Condicionamento do efluente**

O despoeiramento com filtros de mangas pode necessitar do arrefecimento do efluente, se a temperatura for demasiado elevada, ou de aquecimento, se o efluente apresentar risco de condensar.

Quando é necessário o arrefecimento, este é feito normalmente por três métodos: por diluição com o ar ambiente; num permutador de calor ou pela vaporização de água. Cada um destes métodos tem as suas vantagens e desvantagens. O arrefecimento por diluição com o ar ambiente é simples e pouco dispendioso. No entanto, quanto maior for o arrefecimento exigido, mais ar é usado, aumentando de forma significativa o volume de gás a ser filtrado, levando a um aumento da área superficial de filtração e consequente aumento do tamanho e custo das mangas.

O arrefecimento, através de um tipo de permutador de calor, exige equipamento adicional, como exemplo, podemos ter uma superfície estendida de um tubo de escoamento do gás, permitindo o arrefecimento convectivo e radiactivo para o ar circundante. Caso haja uma grande quantidade de calor para ser removido pode ser economicamente atractivo recuperá-lo, por exemplo numa caldeira de calor residual, onde este é utilizado no processo de evaporação.

O arrefecimento por vapor de água envolve um sistema simples de vaporização. A quantidade de água necessária é relativamente pequena, por este motivo o vapor produzido não aumenta consideravelmente o volume total do gás a ser filtrado.

A temperatura e humidade do gás devem ser controladas. O filtro pode necessitar de ser isolado para prevenir a ocorrência de condensação.

A condensação da humidade nas mangas não é muito aceitável, pois daí pode resultar um bolo impermeável.

#### ❖ **Processo de limpeza**

À medida que as partículas são colectadas sobre o suporte de filtração, a perda de carga vai aumentando até atingir o valor máximo considerado adequado. Nesta fase, o filtro necessita de ser limpo. A remoção do bolo de filtração pode ser efectuada por vários processos, de forma descontínua ou de forma contínua, por meios manuais, mecânicos, pneumáticos ou sónicos.

Os sistemas manuais são mais adequados para processos descontínuos de pequenas dimensões.

Os sistemas mecânicos de agitação (vertical ou horizontal) necessitam da paragem completa do efluente.

Os sistemas pneumáticos incluem técnicas de fluxo de ar reverso ou por injeção de pulsos de ar. Na técnica do fluxo de ar reverso são usados anéis que se deslocam ao longo das mangas injectando ar limpo e deformam localmente as mangas. Na técnica de injeção de pulsos de ar são feitas injeções de ar comprimido de curta duração (três jactos de um segundo de duração) que criam ondas de choque soltando desta forma o bolo de filtração (ilustração 2). Em qualquer um dos casos anteriores o processo de remoção do bolo de filtração pode acontecer em simultâneo com o despoeiramento do efluente.

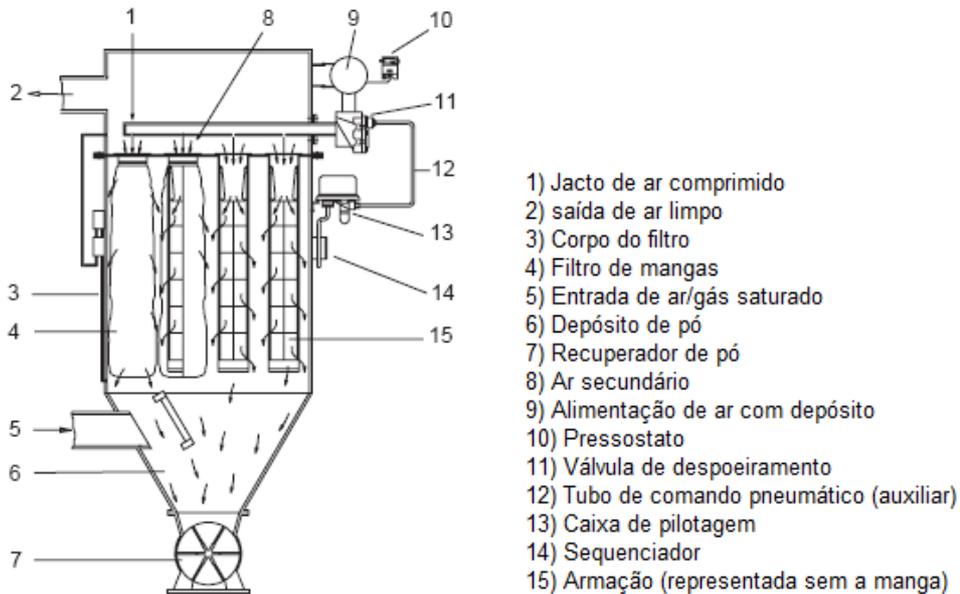


Ilustração 2 – Representação esquemática de um filtro de mangas [59]

### ❖ Área total de filtração

Após efectuada a selecção do tecido, sabendo a velocidade superficial ( $u_0$ ) e o caudal volúmico do gás a tratar ( $G_V$ ), pode ser calculada a área total de filtração através de:

$$S = \frac{G_V}{u_0} \quad (\text{Eq. 14}), [60]$$

As dimensões das mangas (diâmetro e comprimento) são escolhidas a partir das especificações dos fabricantes. O número de mangas é calculado através de:

$$n = \frac{S}{\pi DL} \quad (\text{Eq. 15}), [61]$$

Os sacos normalmente são subdivididos e agrupados em compartimentos de forma que cada compartimento pode ser fechado para limpeza ou reparação sem atrapalhar o processo de filtração. Por esta razão, nos casos dos processos de limpeza por batimento mecânico ou ar reverso, deve introduzir-se uma área adicional, pelo que a área total de mangas necessária é calculada pela multiplicação da área efectiva de

filtração por um factor apropriado dado na tabela 7. Para que a área de filtração seja calculada em m<sup>2</sup>, considera-se que 1ft<sup>2</sup>=0,09290304 m<sup>2</sup> ≅ 0,1 m<sup>2</sup>.

**Tabela 7 – Factor multiplicativo a aplicar à área de filtração [62]**

Área de filtração (ft <sup>2</sup> )	Área de filtração (m <sup>2</sup> )	Factor
1 – 4000	0.1 – 400	2
4001 – 12000	400.1 – 1200	1.5
12001 – 24000	1200.1 - 2400	1.25
24001 – 36000	2400.1 – 3600	1.17
36001 – 48000	3600.1 – 4800	1.125
48001 – 60000	4800.1 – 6000	1.11
60001 – 72000	6000.1 – 7200	1.10
72001 – 84000	7200.1 – 8400	1.09
84001 – 96000	8400.1 – 9600	1.08
96001 – 108000	9600.1 – 10800	1.07
108001 – 132000	10800.1 – 13200	1.06
132001 – 180000	13200.1 – 18000	1.05
>180000	> 18000	1.04

#### ❖ **Determinação do ciclo filtração – limpeza**

A duração do período de filtração depende da concentração do efluente em partículas, que se traduz num aumento da espessura do bolo de filtração ao longo do tempo e um correspondente aumento da perda de carga. Quando se atinge o limite máximo de pressão deve proceder-se à limpeza das magas. É de notar que em situação de funcionamento coexistem diferentes espessuras do bolo de filtração que dependem do momento em que se realizou a respectiva limpeza.

Após o conhecimento de cada um dos colectores, encontram-se representadas na tabela 8 as principais vantagens e desvantagens.

Tabela 8 - Utilização, vantagens e desvantagens dos principais tipos de despoeiradores

Despoeiradores	Usos	Vantagens	Desvantagens
Precipitador Electrostático	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Colheita final para partículas de todos os tamanhos</li> <li>. Fontes medidas a grandes</li> <li>. Em geral para grandes vazões</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Alta eficiência de colheita. Pode exceder 99,9%</li> <li>. Colheita partículas submicrónicas</li> <li>. Baixa perda de carga.</li> <li>. Baixo custo operacional</li> <li>. Colheita a seco possibilitando fácil reutilização</li> <li>. Pode colher partículas sólidas e líquidas que são difíceis de colheita com outros equipamentos</li> <li>. Poucos problemas de manutenção e operação</li> <li>. Podem ser operados continuamente por longos períodos. Processam altas vazões e faixa ampla de concentração</li> <li>. Podem operar em faixa ampla de pressões positivas ou negativas</li> <li>. Vida útil longa, podendo atingir mais de 20 anos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Investimento inicial alto</li> <li>. Requer grande espaço para instalação</li> <li>. Apresenta riscos de explosão quando processa partículas ou gases inflamáveis / explosivos</li> <li>. Exige medidas especiais de segurança contra alta voltagem</li> <li>. Muito sensível a variações de vazão, temperatura e humidade</li> <li>. Alguns materiais são de difícil colheita por apresentarem resistividade alta ou baixa</li> <li>. Exige pessoal qualificado para manutenção</li> <li>. Produção de ozona nas descargas eléctricas</li> </ul>
Colectores centrífugos secos (Ciclones)	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Em geral é utilizado como pré - colectores para partículas de tamanho médio e grande (&gt; 10 micrómetros)</li> <li>. Colector final em alguns casos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Baixo custo de construção</li> <li>. Perda de carga baixa a média</li> <li>. Projecto relativamente simples</li> <li>. Equipamento simples com poucos problemas de manutenção</li> <li>. Simples de operar</li> <li>. Não tem limitação de temperatura e pressão excepto pelo material de construção</li> <li>. Espaço para instalação relativamente pequeno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Baixa eficiência para partículas pequenas (&lt; 10 micrómetros)</li> <li>. Possibilidade de entupimento no material adesivo ou higroscópico</li> <li>. Pode apresentar problemas de abrasão para determinados tipos de partículas e determinadas velocidades</li> <li>. Não pode ser utilizado para partículas com características adesivas</li> </ul>
Filtro de Mangas	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Colector final de partículas de todos os tamanhos inclusive submicrónicas, excepto oleosas e adesivas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Proporciona altas eficiências de colheita (acima de 99%)</li> <li>. Pouco sensível à flutuação de vazão e concentração</li> <li>. Colheita a seco possibilitando recuperação de material sem tratamento</li> <li>. Não apresenta problemas de resíduos líquidos</li> <li>. Corrosão pouco acentuada</li> <li>. Manutenção simples</li> <li>. Operação relativamente simples</li> <li>. Princípio de funcionamento e projecto simples</li> <li>. Perda de carga e custo de operação moderados</li> <li>. Vida útil longa (10 a 15 anos)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Temperaturas máximas limitadas em função do material das mangas</li> <li>. Pode requerer tratamento especial das mangas para determinadas aplicações</li> <li>. Custo de manutenção alto (troca de mangas)</li> <li>. Material higroscópico, adesivos e condensação de humidade podem ocasionar entupimento das mangas</li> <li>. Localização de mangas furadas relativamente difícil</li> <li>. Requer espaço razoável especialmente no caso de limpeza por fluxo reverso e por vibração</li> </ul>

# Capítulo V

## 5 Caso de Estudo

Tendo em conta que o caso em estudo tem por base, alguns dados recolhidos na Central Termoeléctrica de Biomassa em Belmonte, faz-se uma pequena introdução relativamente a esta central.

Fez-se uma visita ao local no dia 17 de Dezembro de 2010. No momento da visita a central encontrava-se na fase de arranque.

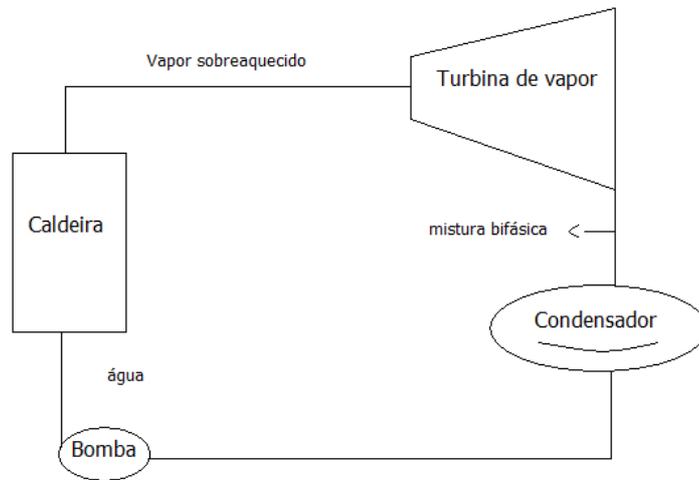
A CTBB (imagem 46), funciona há aproximadamente um ano, ainda é muito recente e encontra-se em fase experimental.



**Imagem 46 – Central de termoelectrica de biomassa em Belmonte**

Recebe resíduos florestais e agrícolas de vários locais, tais como: Guarda, Manteigas, Sabugal, Covilhã, Fundão e mais recentemente de São Pedro do Sul. Essa madeira é posteriormente estilhaçada (imagem 47). A energia da biomassa é transformada em energia eléctrica e térmica.

A Central Termoeléctrica de Biomassa de Belmonte funciona segundo o ciclo de Rankine, com uma turbina de vapor (ilustração 3).



**Ilustração 3 – Ciclo de Rankine [63]**

Esta central pode fazer também um aproveitamento do calor dissipado no condensador, isto é, está preparada para funcionar em co-geração e fornecer calor ao hotel e às piscinas que se encontram nas proximidades.



**Imagem 47 – Armazém de biomassa com estilha de madeira**

Possui uma caldeira para queima da biomassa do tipo aquotubular (imagens 48 e 49).



**Imagem 48 – Caldeira utilizada na CTBB**



**Imagem 49 – Combustão de biomassa no interior da caldeira**

O tratamento dos efluentes gasosos é realizado através de dois tipos de colectores: um multiciclone constituído por dois ciclones a jusante da caldeira (imagem 50) e um filtro de mangas (imagem 51) a seguir ao multiciclone.



**Imagem 50 – Multiciclone**



**Imagem 51 – Filtro de mangas**

Devido à central se encontrar com problemas por ser ainda muito jovem, não foi possível recolher todos os dados pretendidos para este projecto. Por esse motivo adoptaram-se valores correntemente utilizados na bibliografia, para os parâmetros a utilizar no dimensionamento do multiciclone e do filtro de mangas.

## 5.1 Dimensionamento do multiciclone

Para iniciar o dimensionamento de um multiciclone considerou-se que este é constituído por ciclones de fluxo invertido e entrada tangencial e de tamanho inferior a um ciclone único.

Teve-se ainda em conta que este multiciclone é constituído por quatro ciclones. Para um funcionamento eficiente e económico a velocidade de entrada do gás deve estar compreendido entre 15 e 30 m/s.

Admitiu-se desta forma que a velocidade de entrada é de 25 m/s.

Começou por se identificar cada uma das partes que constituem um ciclone; o diâmetro do corpo cilíndrico, altura da secção rectangular da entrada de gás, largura da secção rectangular de entrada do gás, altura do corpo cilíndrico, o diâmetro da conduta de saída do gás limpo, a altura de conduta de saída do gás limpo, a altura total do ciclone e o diâmetro da conduta de saída de partículas. Os restantes três ciclones têm as mesmas dimensões e os mesmos constituintes deste.

Consideram-se os seguintes parâmetros:

- Caudal volúmico ( $G_v$ ) =  $45000 \text{ m}^3/\text{h} = 45000/3600 = 12.5 \text{ m}^3/\text{s}$
- Velocidade de entrada ( $u_0$ ) = 25 m/s
- Viscosidade dinâmica do gás ( $\mu_G$ ) =  $2.25 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$
- Massa volúmica das partículas ( $\rho_p$ ) =  $1500 \text{ kg/m}^3$
- Massa volúmica do gás ( $\rho_G$ ) =  $0.90 \text{ kg/m}^3$
- Temperatura de funcionamento =  $140 \text{ }^\circ\text{C} = 413.15 \text{ K}$

De seguida calculou-se a área da secção rectangular de entrada do gás, para se efectuar o seu dimensionamento.

Sabendo que a área é igual á razão entre o caudal volúmico e a velocidade de entrada, e tendo por base as seguintes equações, temos:

$$G_v = A \times u_0 \leftrightarrow A = \frac{G_v}{u_0} \quad , [64]$$

$$A = \frac{12.5}{25} = 0.5 \text{ m}^2$$

Onde  $A = a \times b$

A configuração do ciclone consiste num conjunto de parâmetros adimensionais, que são a razão entre qualquer uma das dimensões e o diâmetro.

Considera-se ainda que os ciclones com a mesma configuração podem dizer-se da mesma família. Na tabela 9, apresentam-se os parâmetros que correspondem a cinco configurações mais comuns, figurando ainda os parâmetros  $K_L$  (comprimento natural do ciclone),  $K$  (eficiência),  $N_H$  (perda de carga) e o parâmetro de desempenho (quociente entre a eficiência e a perda de carga).

**Tabela 9 – Configurações mais comuns de algumas famílias de ciclones de entrada tangencial [65]**

Parâmetro	Alta Eficiência		Geral		Outras
	Stairmand	Swift	Lapple	Swift	Peterson & Whitby
$K_a$	0.5	0.44	0.5	0.5	0.583
$K_b$	0.2	0.21	0.25	0.25	0.208
$K_S$	0.5	0.5	0.625	0.6	0.583
$K_{De}$	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
$K_h$	1.5	1.4	2.0	1.75	1.333
$K_B$	0.375	0.4	0.25	0.4	0.5
$K_H$	4.0	3.9	4.0	3.75	3.17
$K_L$	2.48	2.04	2.30	2.30	2.32
$K$	551.3	699.2	402.9	381.8	324.3
$N_H$	6.40	9.24	8.0	8.0	7.76
$K / N_H$	86.1	75.7	50.4	47.7	44.1

As configurações da tabela 9 têm aplicação específica em situações de interesse prático diferente. Para o caso do modelo Swift de Alta Eficiência maximiza a eficiência, enquanto o modelo Stairmand minimiza as perdas de carga sem diminuir demasiado a eficiência. Tendo isto em conta para o caso em estudo, optou-se pelo ciclone de Alta Eficiência do modelo Stairmand.

De seguida determinou-se o diâmetro do ciclone, bem como as restantes dimensões, tendo em conta a tabela 9 e as equações de 1 a 8 inclusive.

$$a \times b = \frac{G_V}{4u_0} = \frac{12.5}{4 \times 25} = 0.125 \text{ m}$$

$$K_a = \frac{a}{D} \leftrightarrow a = K_a \times D \quad \text{então} \quad K_b = \frac{b}{D} \leftrightarrow b = K_b \times D$$

$$a \times b = K_a \times K_b \times D^2 \leftrightarrow D^2 = \frac{0.125}{K_a \times K_b} \leftrightarrow D = \sqrt{\frac{0.125}{0.5 \times 0.2}} \leftrightarrow D = 1.12 \text{ m}$$

$$a = K_a \times D = 0.5 \times 1.12 = 0.560 \text{ m}$$

$$b = K_b \times D = 0.2 \times 1.12 = 0.224 \text{ m}$$

$$S = K_S \times D = 0.5 \times 1.12 = 0.560 \text{ m}$$

$$De = K_{De} \times D = 0.5 \times 1.12 = 0.560 \text{ m}$$

$$h = K_h \times D = 1.5 \times 1.12 = 1.680 \text{ m}$$

$$H = K_H \times D = 4.0 \times 1.12 = 4.480 \text{ m}$$

$$B = K_B \times D = 0.375 \times 1.12 = 0.420 \text{ m}$$

Como o multiciclone a dimensionar é constituído por quatro ciclones idênticos ao do esquema indicado na imagem 52 e perspectiva da imagem 53, cada um dos ciclones vai ter as dimensões calculadas anteriormente.

De referir na imagem 53, que a secção de entrada é rectangular e não circular como se mostra na imagem.

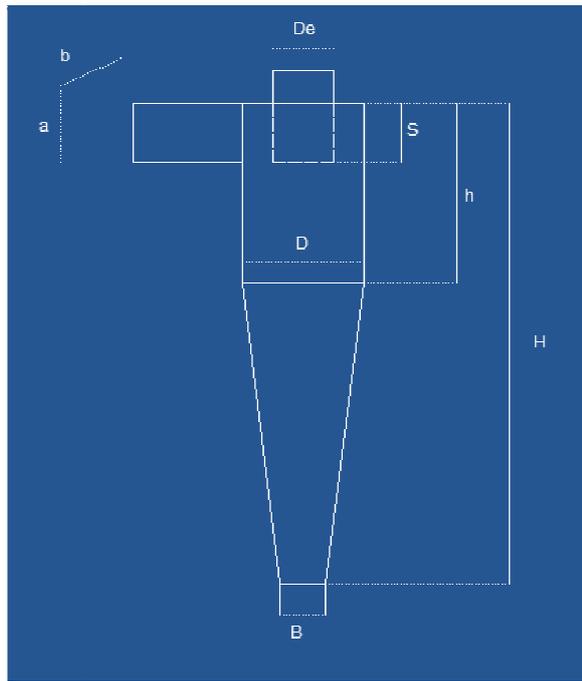


Imagem 52 – Esquema do alçado do ciclone que se obteve tendo em conta os cálculos efectuados

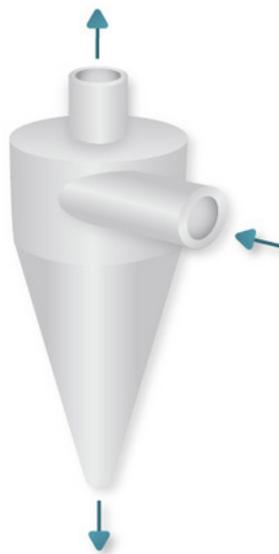


Imagem 53 – Ciclone visto em perspectiva [66]

Outro parâmetro importante a ter em conta é a perda de carga ( $N_H$ ), que deve ser diminuída e calculada a partir da seguinte equação:

$$N_H = 16 \frac{K_a K_b}{K_{De}^2} \quad (\text{Eq. 16}), [67]$$

$$N_H = 16 \times \frac{0.5 \times 0.2}{(0.5)^2} = 6.40 \quad (\text{De acordo com o valor indicado na tabela 9})$$

Após os cálculos anteriores procedeu-se á determinação do diâmetro de corte do ciclone. O modelo simples de eficiência é conhecido como modelo de Lapple do diâmetro de corte. É necessário conhecer o diâmetro de corte ( $dp_c=dp_{50}$ ), em micrómetros, ou seja, o diâmetro da partícula que é capturada com uma eficiência de 50% para a partir deste diâmetro se poder determinar a curva de eficiência específica.

Determinou-se o diâmetro de corte tendo em conta as equações 9 e 10 anteriormente representadas.

$$N_e = \frac{1}{0.560} \left( 1.680 + \frac{4.480 - 1.680}{2} \right) \cong 5.5 \text{ voltas}$$

$$dp_{50} = 10^6 \times \sqrt{\frac{9 \times (2.25 \times 10^{-5}) \times 0.224}{2\pi \times 5.5 \times 25 \times (1500 - 0.90)}} = 5.918 \times 10^{-6} \text{ m} \cong 5.918 \mu\text{m}$$

Após a determinação do diâmetro de corte calculou-se a eficiência específica do ciclone representada pela equação 11, admitindo um diâmetro de partículas ( $dp$ ) de 5  $\mu\text{m}$  até 10  $\mu\text{m}$ .

$$\eta(dp) = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{5.918}{5}\right)^2\right)} = 0,42 \rightarrow 42\%$$

$$\eta(dp) = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{5.918}{10}\right)^2\right)} = 0,74 \rightarrow 74\%$$

Construiu-se a curva de eficiência de ciclones, a partir da tabela 10, considerando o diâmetro adimensional de partícula  $\frac{dpi}{dpc}$ , onde  $dpi$  é o diâmetro da partícula considerado.

Tabela 10 – Relação entre o diâmetro das partículas e o rendimento do ciclone

dpi ( $\mu\text{m}$ )	dpi/dpc	$\eta$
1.21	0.20	0.04
1.75	0.30	0.08
2.96	0.50	0.20
4.15	0.70	0.33
5.92	1.00	0.50
8.83	1.49	0.69
11.84	2.00	0.80
17.75	3.00	0.90
28.99	4.90	0.96
41.43	7.00	0.98
58.88	9.95	0.99

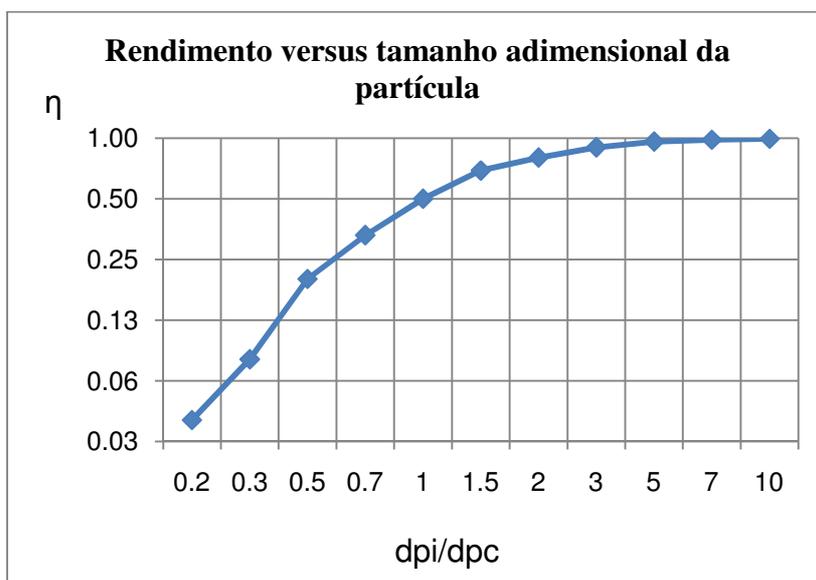


Gráfico 1 - Curva de eficiência de ciclones

Para partículas com 10  $\mu\text{m}$  obtém-se uma eficiência de 74%. Para se obter uma maior eficiência do multiciclone as soluções seriam; diminuir o diâmetro ou aumentar o comprimento do corpo do ciclone.

➤ **Opção mult ciclones**

Uma outra opção e eventualmente mais cara, e menos realista, seria a construção de muitos mais ciclones que iriam constituir o mult ciclone e desta forma aumentar a eficiência de recolha de partículas com tamanho de 10 µm. Senão vejamos:

Para um mult ciclone constituído por 500 ciclones (para este efeito poderia considerar-se um outro numero de ciclones).

Efectuaram-se os cálculos anteriores, agora para este número de ciclones, e obtiveram-se os seguintes resultados.

$$a \times b = \frac{G_v}{500 \times u_0} = \frac{12.5}{500 \times 25} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$a \times b = K_a \times K_b \times D^2 \Leftrightarrow D^2 = \frac{1 \times 10^{-3}}{K_a \times K_b} \Leftrightarrow D = \sqrt{\frac{1 \times 10^{-3}}{0.5 \times 0.2}} \Leftrightarrow D = 0.1 \text{ m}$$

Obteve-se um diâmetro bastante mais pequeno.

$$a = K_a \times D = 0.5 \times 0.1 = 0.050 \text{ m}$$

$$b = K_b \times D = 0.2 \times 0.1 = 0.020 \text{ m}$$

$$S = K_S \times D = 0.5 \times 0.1 = 0.050 \text{ m}$$

$$D_e = K_{D_e} \times D = 0.5 \times 0.1 = 0.050 \text{ m}$$

$$h = K_h \times D = 1.5 \times 0.1 = 0.150 \text{ m}$$

$$H = K_H \times D = 4.0 \times 0.1 = 0.400 \text{ m}$$

$$B = K_B \times D = 0.375 \times 0.1 = 0.0375 \text{ m}$$

Uma vez que a determinação destas dimensões depende do diâmetro do ciclone, obtiveram-se valores também muito mais pequenos.

$$N_H = 16 \times \frac{0.5 \times 0.2}{(0.5)^2} = 6.40 \quad (\text{De acordo com o valor da tabela 9})$$

$$N_e = \frac{1}{0.050} \left( 0.150 + \frac{0.400 - 0.150}{2} \right) \cong 5.5 \text{ voltas}$$

$$dp_{50} = 10^6 \times \sqrt{\frac{9 \times (2.25 \times 10^{-5}) \times 0.020}{2\pi \times 5.5 \times 25 \times (1500 - 0.90)}} = 1.768 \times 10^{-6} \text{m} \cong 1.768 \mu\text{m}$$

$$\eta(dp) = \frac{1}{(1 + (\frac{1.768}{5})^2)} = 0.89 \rightarrow 89\%$$

$$\eta(dp) = \frac{1}{(1 + (\frac{1.768}{10})^2)} = 0.97 \rightarrow 97\%$$

Obteve-se uma eficiência de colecta de 97% para partículas de 10 μm de tamanho. Como a solução anterior não era a pretendida, pelos inconvenientes já referidos, em vez de se optar por um multiciclone constituído por 500 ciclones, poderia optar-se por uma solução mais eficiente que passa por aplicar um filtro de mangas a seguir ao multiciclone constituído pelos 4 ciclones anteriormente dimensionado.

## 5.2 Dimensionamento do filtro de mangas

Encontram-se de seguida os cálculos efectuados para o caso de se optar pelo filtro de mangas como tratamento final do efluente gasoso.

Para isso escolheu-se a fibra a utilizar no filtro de mangas tendo em conta a tabela 6.

Uma boa escolha seria o Teflon, mas como possui a particularidade de ser muito caro, optou-se por uma fibra cujas propriedades fossem semelhantes às do Teflon mas que por outro lado fosse mais económica, que é o caso da Nomex, podendo ser utilizada para temperaturas elevadas.

De seguida efectuou-se o dimensionamento do filtro de mangas, para isso começou por calcular-se a área de filtração através da equação 14.

Optou-se por trabalhar com filtros em sobre pressão e com velocidade de 1.5cm/s.

$$S = \frac{12.5}{0.015} = 833.333 \text{ m}^2$$

Considerando agora que o diâmetro do filtro de mangas é de 12.7cm e que a altura de cada manga é de 2.5m, calculou-se o número de mangas do filtro (equação 15).

$$833.333 = n \times \pi \times 0.127 \times 2.5 \leftrightarrow n = 835.459 \text{ mangas} \cong 840 \text{ mangas}$$

A área total de mangas necessária é calculada pela multiplicação da área efectiva de filtração por um factor adequado da tabela 7.

Então:

$$833.333\text{m}^2 = 8969.922 \text{ ft}^2 \cong 9000 \text{ ft}^2$$

Pela tabela 7, corresponde a um factor de 1.5.

A área total de mangas necessária, caso a limpeza não se realizasse de forma contínua seria de:  $833.333 \times 1.5 = 1249.999 \text{ m}^2$ . Neste caso a limpeza efectua-se de modo contínuo, pelo que não será necessário efectuar o cálculo anterior.

Partindo dos cálculos anteriores, considerou-se que o filtro de mangas é constituído por 864 mangas (6x144), para fins de cálculo, seis compartimentos, cada um com doze rampas e doze mangas por rampa.

A característica mais importante dos filtros de mangas é a sua grande eficiência. A concentração das partículas á saída é cerca de 20 a 30 mg/Nm<sup>3</sup>. Após a sua passagem pelo multiciclone e posterior passagem para o filtro de mangas esta concentração vai ser muito baixa.

Por fim fez-se a representação esquemática dos equipamentos utilizados para o caso em estudo (imagem 54).

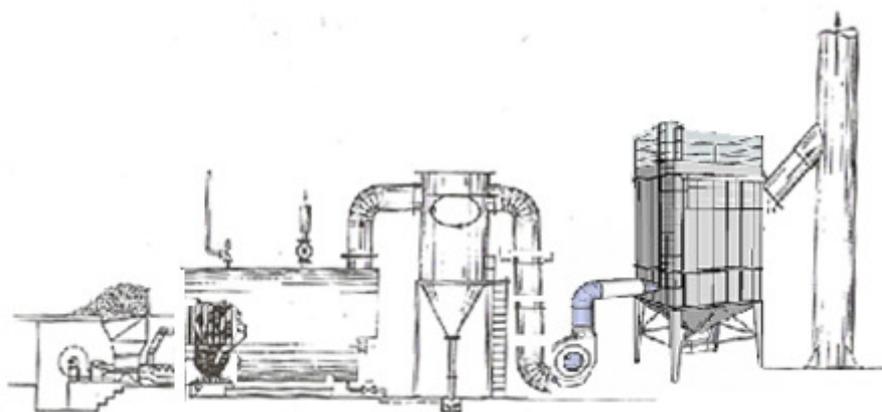


Imagem 54 – Esquema dos equipamentos utilizados para o caso de estudo [68]

# Capítulo VI

## 6 Conclusão

A biomassa pode ser uma boa opção para aproveitamento energético, pois possui as seguintes vantagens: baixo custo; é renovável; permite o reaproveitamento de resíduos e é menos poluente que outras formas de energias como a que se obtém a partir de combustíveis fósseis e ainda diminui o perigo de fogos florestais, pois contribui para a limpeza e manutenção das matas e ainda para um aumento de empregos.

Relativamente ao tipo de caldeiras, as mais utilizadas são: as caldeiras de tubos de fumo e as caldeiras aquotubulares. Para minimizar a quantidade de material particulado dos efluentes gasosos lançados para a atmosfera, deve optar-se, pela colocação de um sistema de despoeiramento antes de lançar os poluentes pela chaminé para a atmosfera.

Os despoeiradores mais utilizados para a colecta de partículas são: os ciclones, os mult ciclones, filtros electrostáticos e os filtros de mangas.

Para tamanhos de partículas com diâmetros mais pequenos o ciclone não consegue fazer a sua remoção com tanta eficiência, ou seja, possui um rendimento mais baixo para estas partículas, removendo com maior eficiência partículas mais grosseiras.

Para este projecto considerou-se que a opção mais correcta passa pela construção de um mult ciclone imediatamente a seguir á caldeira seguido de um filtro de mangas constituído por 840 mangas. Desta forma a eficiência de recolha de partículas seria muito superior a 90%. Esta solução é preferível à utilização de um mult ciclone constituído por 500 ciclones, que necessitaria de grandes áreas para a sua construção e em termos económicos não seria muito favorável.

A solução recomendada neste projecto encontra-se próxima da adoptada para a Central Termoeléctrica de Biomassa de Belmonte.

## Referências bibliográficas

- [1] [http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://www.pelletslar.com/pagina/uploads/\\_fckeditor/image/ciclo\\_biomassa\\_pt.jpg&imgrefurl=http://www.pelletslar.com/%3FpID%3D34%26selID%3D34%257C45&usq=CT7GkbF5OJIVfmiUmSa46cLITAw=&h=358&w=374&sz=30&hl=pt-PT&start=2&um=1&itbs=1&tbnid=FpP2X22x8dZ9qM:&tbnh=117&tbnw=122&prev=/images%3Fq%3DBiomassa%26um%3D1%26hl%3Dpt-PT%26sa%3DN%26rlz%3D1W1ASUS\\_pt-PT%26tbs%3Disch:1](http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://www.pelletslar.com/pagina/uploads/_fckeditor/image/ciclo_biomassa_pt.jpg&imgrefurl=http://www.pelletslar.com/%3FpID%3D34%26selID%3D34%257C45&usq=CT7GkbF5OJIVfmiUmSa46cLITAw=&h=358&w=374&sz=30&hl=pt-PT&start=2&um=1&itbs=1&tbnid=FpP2X22x8dZ9qM:&tbnh=117&tbnw=122&prev=/images%3Fq%3DBiomassa%26um%3D1%26hl%3Dpt-PT%26sa%3DN%26rlz%3D1W1ASUS_pt-PT%26tbs%3Disch:1) (Consultado em Março de 2010)
- [2] – <http://www.greenpro.de/po/bioenergia.pdf> (Consultado em Março de 2010)
- [3] – <http://www.greenpro.de/po/bioenergia.pdf> (Consultado em Março de 2010)
- [4] – <http://www.greenpro.de/po/bioenergia.pdf> (Consultado em Março de 2010)
- [5] – [http://www.google.pt/images?q=residuos+org%3A2nicos&um=1&hl=pt-PT&rlz=1W1ASUS\\_pt-PT&tbs=isch:1&sa=N&start=140&ndsp=20](http://www.google.pt/images?q=residuos+org%3A2nicos&um=1&hl=pt-PT&rlz=1W1ASUS_pt-PT&tbs=isch:1&sa=N&start=140&ndsp=20) (Consultado em Março de 2010)
- [6] – [http://www.google.pt/images?hl=pt-PT&gbv=2&tbs=isch%3A1&sa=1&q=colheita+de+energia+girassol&aq=f&aqi=&aql=&oq=&gs\\_rfai=](http://www.google.pt/images?hl=pt-PT&gbv=2&tbs=isch%3A1&sa=1&q=colheita+de+energia+girassol&aq=f&aqi=&aql=&oq=&gs_rfai=) (Consultado em Março de 2010)
- [7] [http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheNoticias.asp?ID\\_conteudo=374&ID\\_area=2&ID\\_sub\\_area=1](http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheNoticias.asp?ID_conteudo=374&ID_area=2&ID_sub_area=1) (Consultado em Março de 2010)
- [8] [http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://www.jari.com.br/shared/florestal\\_f03.jpg&imgrefurl=http://www.jari.com.br/web/pt/operacoes/florestal.htm&usq=Gf8StUqxd\\_s\\_igiyCIudT9pi5QnM=&h=120&w=160&sz=11&hl=pt-PT&start=24&itbs=1&tbnid=5WYDiuwCVzRc2M:&tbnh=74&tbnw=98&prev=/images%3Fq%3Dcolheita%2Bde%2Bmadeira%2Bmecanizada%26start%3D20%26hl%3Dpt-PT%26sa%3DN%26gbv%3D2%26ndsp%3D20%26tbs%3Disch:1](http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://www.jari.com.br/shared/florestal_f03.jpg&imgrefurl=http://www.jari.com.br/web/pt/operacoes/florestal.htm&usq=Gf8StUqxd_s_igiyCIudT9pi5QnM=&h=120&w=160&sz=11&hl=pt-PT&start=24&itbs=1&tbnid=5WYDiuwCVzRc2M:&tbnh=74&tbnw=98&prev=/images%3Fq%3Dcolheita%2Bde%2Bmadeira%2Bmecanizada%26start%3D20%26hl%3Dpt-PT%26sa%3DN%26gbv%3D2%26ndsp%3D20%26tbs%3Disch:1) (Consultado em Março de 2010)
- [9] – <http://www.greenpro.de/po/bioenergia.pdf> (Consultado em Abril de 2010)
- [10] – <http://www.greenpro.de/po/bioenergia.pdf> (Consultado em Abril de 2010)
- [11] – <http://www.greenpro.de/po/bioenergia.pdf> (Consultado em Abril de 2010)

- [12] [http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://www.prof2000.pt/users/jorgeneto/8\\_D/Andre\\_Dias\\_Bruno/biomassa.jpg&imgrefurl=http://www.prof2000.pt/users/jorgeneto/8\\_D/Andre\\_Dias\\_Bruno/andre\\_dias\\_bruno.htm&usg=\\_\\_ctPi8PjyXmZp0JIFML1QIbcmQS4=&h=327&w=293&sz=30&hl=pt-PT&start=11&um=1&itbs=1&tbnid=mchLCZvn6Neg8M:&tbnh=118&tbnw=106&prev=/images%3Fq%3Dresiduos%2Bde%2Bmadeira%26um%3D1%26hl%3Dpt-PT%26rlz%3D1R2ASUS\\_pt-PT%26tbs%3Disch:1](http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://www.prof2000.pt/users/jorgeneto/8_D/Andre_Dias_Bruno/biomassa.jpg&imgrefurl=http://www.prof2000.pt/users/jorgeneto/8_D/Andre_Dias_Bruno/andre_dias_bruno.htm&usg=__ctPi8PjyXmZp0JIFML1QIbcmQS4=&h=327&w=293&sz=30&hl=pt-PT&start=11&um=1&itbs=1&tbnid=mchLCZvn6Neg8M:&tbnh=118&tbnw=106&prev=/images%3Fq%3Dresiduos%2Bde%2Bmadeira%26um%3D1%26hl%3Dpt-PT%26rlz%3D1R2ASUS_pt-PT%26tbs%3Disch:1) (Consultado em Abril de 2010)
- [13] – <http://www.greenpro.de/po/bioenergia.pdf> (Consultado em Abril de 2010)
- [14] – <http://www.google.pt/images?q=pellets+de+madeira&hl=pt-PT&gbv=2&tbs=isch:1&sa=N&start=120&ndsp=20> (Consultado em Maio de 2010)
- [15] – <http://www.greenpro.de/po/bioenergia.pdf> (Consultado em Maio de 2010)
- [16] – <http://www.google.pt/images?q=estilhas+de+madeira&hl=pt-PT&gbv=2&tbs=isch%3A1&sa=2> (Consultado em Maio de 2010)
- [17] – [http://2.bp.blogspot.com/\\_IR\\_FqRj9WOM/Rk8zRGJg4pI/AAAAAAAAAnU/-SJd9d\\_y3g/s1600-h/070519-Escravidude-01.jpg](http://2.bp.blogspot.com/_IR_FqRj9WOM/Rk8zRGJg4pI/AAAAAAAAAnU/-SJd9d_y3g/s1600-h/070519-Escravidude-01.jpg) (Consultado em Maio de 2010)
- [18] – <http://www.google.pt/images?q=briquetes+de+madeira&hl=pt-PT&gbv=2&tbs=isch:1&sa=N&start=40&ndsp=20> (Consultado em Maio de 2010)
- [19] – <http://ipt.olhares.com/data/big/69/698857.jpg> (Consultado em Maio de 2010)
- [20] – Adaptado da sebenta das aulas de Tratamento de Efluentes Gasosos (Consultado em Maio de 2010)
- [21] – Adaptado da sebenta das aulas de Tratamento de Efluentes Gasosos (Consultado em Maio de 2010)
- [22] – Adaptado da sebenta das aulas de Tratamento de Efluentes Gasosos (Consultado em Maio de 2010)
- [23] [http://www.google.pt/images?hl=ptPT&source=imghp&biw=1259&bih=632&q=reactor+de+pir%C3%B3lise&gbv=2&aq=f&aqi=&aql=&oq=&gs\\_rfai=#0,232](http://www.google.pt/images?hl=ptPT&source=imghp&biw=1259&bih=632&q=reactor+de+pir%C3%B3lise&gbv=2&aq=f&aqi=&aql=&oq=&gs_rfai=#0,232) (Consultado em Junho de 2010)
- [24] – <http://www.greenpro.de/po/bioenergia.pdf> (Consultado em Junho de 2010)
- [25] – <http://www.greenpro.de/po/bioenergia.pdf> (Consultado em Junho de 2010)

- [26][\[26\]\[http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://1.bp.blogspot.com/\\\_grSyOiusGZQ/SQ4OkfWrZ1I/AAAAAAAAABiE/INU3iSpXxfE/s400/lareira\\\_zorate.jpg&imgrefurl=http://hortadozorate.blogspot.com/2008/11/combater-o-frio-com-lareira-recuperador.html&usq=WsqB4N0893jp9J1wSf780Zv YIU=&h=266&w=400&sz=31&hl=pt-pt&start=12&zoom=1&um=1&itbs=1&tbnid=O6Am5x8kiv6NnM:&tbnh=82&tbnw=124&prev=/images%3Fq%3DLAREIRAS%2BABERTAS%26um%3D1%26hl%3Dpt-pt%26rlz%3D1W1ASUS\\\_pt-PT%26tbs%3Disch:1\]\(http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://1.bp.blogspot.com/\_grSyOiusGZQ/SQ4OkfWrZ1I/AAAAAAAAABiE/INU3iSpXxfE/s400/lareira\_zorate.jpg&imgrefurl=http://hortadozorate.blogspot.com/2008/11/combater-o-frio-com-lareira-recuperador.html&usq=WsqB4N0893jp9J1wSf780Zv YIU=&h=266&w=400&sz=31&hl=pt-pt&start=12&zoom=1&um=1&itbs=1&tbnid=O6Am5x8kiv6NnM:&tbnh=82&tbnw=124&prev=/images%3Fq%3DLAREIRAS%2BABERTAS%26um%3D1%26hl%3Dpt-pt%26rlz%3D1W1ASUS\_pt-PT%26tbs%3Disch:1\) \(Consultado em Julho de 2010\)](http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://1.bp.blogspot.com/_grSyOiusGZQ/SQ4OkfWrZ1I/AAAAAAAAABiE/INU3iSpXxfE/s400/lareira_zorate.jpg&imgrefurl=http://hortadozorate.blogspot.com/2008/11/combater-o-frio-com-lareira-recuperador.html&usq=WsqB4N0893jp9J1wSf780Zv YIU=&h=266&w=400&sz=31&hl=pt-pt&start=12&zoom=1&um=1&itbs=1&tbnid=O6Am5x8kiv6NnM:&tbnh=82&tbnw=124&prev=/images%3Fq%3DLAREIRAS%2BABERTAS%26um%3D1%26hl%3Dpt-pt%26rlz%3D1W1ASUS_pt-PT%26tbs%3Disch:1)
- [27][\[27\]\[http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://www.lflareiras.com.br/site/images/prod/salamandra\\\_130p.jpg&imgrefurl=http://www.lflareiras.com.br/site/index.php%3Foption%3Dcom\\\_produtos%26pid%3D0%26id%3D7&usq=95ZJHLWLi7cpJ-UHyHp245RUahc=&h=194&w=194&sz=23&hl=pt-pt&start=22&zoom=0&um=1&itbs=1&tbnid=hnyR3ntsVzo69M:&tbnh=103&tbnw=103&prev=/images%3Fq%3DLAREIRAS%2BABERTAS%26start%3D20%26um%3D1%26hl%3Dpt-pt%26sa%3DN%26rlz%3D1W1ASUS\\\_pt-PT%26ndsp%3D20%26tbs%3Disch:1\]\(http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://www.lflareiras.com.br/site/images/prod/salamandra\_130p.jpg&imgrefurl=http://www.lflareiras.com.br/site/index.php%3Foption%3Dcom\_produtos%26pid%3D0%26id%3D7&usq=95ZJHLWLi7cpJ-UHyHp245RUahc=&h=194&w=194&sz=23&hl=pt-pt&start=22&zoom=0&um=1&itbs=1&tbnid=hnyR3ntsVzo69M:&tbnh=103&tbnw=103&prev=/images%3Fq%3DLAREIRAS%2BABERTAS%26start%3D20%26um%3D1%26hl%3Dpt-pt%26sa%3DN%26rlz%3D1W1ASUS\_pt-PT%26ndsp%3D20%26tbs%3Disch:1\) \(Consultado em Julho de 2010\)](http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://www.lflareiras.com.br/site/images/prod/salamandra_130p.jpg&imgrefurl=http://www.lflareiras.com.br/site/index.php%3Foption%3Dcom_produtos%26pid%3D0%26id%3D7&usq=95ZJHLWLi7cpJ-UHyHp245RUahc=&h=194&w=194&sz=23&hl=pt-pt&start=22&zoom=0&um=1&itbs=1&tbnid=hnyR3ntsVzo69M:&tbnh=103&tbnw=103&prev=/images%3Fq%3DLAREIRAS%2BABERTAS%26start%3D20%26um%3D1%26hl%3Dpt-pt%26sa%3DN%26rlz%3D1W1ASUS_pt-PT%26ndsp%3D20%26tbs%3Disch:1)
- [28][\[28\]\[http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://www.solici clima.com/pt/images/caldera\\\_biomasa\\\_h2o.jpg&imgrefurl=http://www.solici clima.com/pt/calderas-pellets.htm&usq=pB-vW7SoTrePqxOH-OIOO5kFyQA=&h=398&w=198&sz=16&hl=pt-pt&start=18&zoom=1&um=1&itbs=1&tbnid=i7mOIXg3Da5xAM:&tbnh=124&tbnw=62&prev=/images%3Fq%3DCALDEIRAS%2BA%2BPELLETES%26um%3D1%26hl%3Dpt-pt%26rlz%3D1W1ASUS\\\_pt-PT%26tbs%3Disch:1\]\(http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://www.solici clima.com/pt/images/caldera\_biomasa\_h2o.jpg&imgrefurl=http://www.solici clima.com/pt/calderas-pellets.htm&usq=pB-vW7SoTrePqxOH-OIOO5kFyQA=&h=398&w=198&sz=16&hl=pt-pt&start=18&zoom=1&um=1&itbs=1&tbnid=i7mOIXg3Da5xAM:&tbnh=124&tbnw=62&prev=/images%3Fq%3DCALDEIRAS%2BA%2BPELLETES%26um%3D1%26hl%3Dpt-pt%26rlz%3D1W1ASUS\_pt-PT%26tbs%3Disch:1\) \(Consultado em Julho de 2010\)](http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://www.solici clima.com/pt/images/caldera_biomasa_h2o.jpg&imgrefurl=http://www.solici clima.com/pt/calderas-pellets.htm&usq=pB-vW7SoTrePqxOH-OIOO5kFyQA=&h=398&w=198&sz=16&hl=pt-pt&start=18&zoom=1&um=1&itbs=1&tbnid=i7mOIXg3Da5xAM:&tbnh=124&tbnw=62&prev=/images%3Fq%3DCALDEIRAS%2BA%2BPELLETES%26um%3D1%26hl%3Dpt-pt%26rlz%3D1W1ASUS_pt-PT%26tbs%3Disch:1)
- [29] – Juanico, Filipe J. M., (1991); *Geradores de Calor*, Ecemei Lda., Porto (Consultado em Julho de 2010 – página 22)
- [30] – Juanico, Filipe J. M., (1991); *Geradores de Calor*, Ecemei Lda., Porto (Consultado em Julho de 2010 - página 23)
- [31] – Juanico, Filipe J. M., (1991); *Geradores de Calor*, Ecemei Lda., Porto (Consultado em Julho de 2010 - página 24)

- [32] - Juanico, Filipe J. M., (1991); *Geradores de Calor*, Ecemei Lda., Porto (Consultado em Julho de 2010 - página 25)
- [33] – Juanico, Filipe J. M., (1991); *Geradores de Calor*, Ecemei Lda., Porto (Consultado em Julho de 2010 - página 33)
- [34] – Juanico, Filipe J. M., (1991); *Geradores de Calor*, Ecemei Lda., Porto (Consultado em Julho de 2010 - página 34)
- [35] – Juanico, Filipe J. M., (1991); *Geradores de Calor*, Ecemei Lda., Porto (Consultado em Julho de 2010 - página 35)
- [36] – Juanico, Filipe J. M., (1991); *Geradores de Calor*, Ecemei Lda., Porto (Consultado em Julho de 2010 - página 36)
- [37] – Juanico, Filipe J. M., (1991); *Geradores de Calor*, Ecemei Lda., Porto (Consultado em Julho de 2010 - página 39)
- [38] – <http://fisica.cdcc.sc.usp.br/olimpiadas/02/palestras/PA1.html> (Consultado em Agosto de 2010)
- [39] – <http://fisica.cdcc.sc.usp.br/olimpiadas/02/palestras/PA1.html> (Consultado em Agosto de 2010)
- [40] – [http://www.hamon.com.br/prod\\_esp\\_func.htm](http://www.hamon.com.br/prod_esp_func.htm) (Consultado em Agosto de 2010)
- [41] – [http://www.hamon.com.br/prod\\_esp\\_func.htm](http://www.hamon.com.br/prod_esp_func.htm) (Consultado em Agosto de 2010)
- [42] – [http://www.hamon.com.br/prod\\_esp\\_func.htm](http://www.hamon.com.br/prod_esp_func.htm) (Consultado em Agosto de 2010)
- [43] – Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Separação Ciclónica*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Setembro de 2010 - página 4)
- [44] – Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Separação Ciclónica*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Setembro de 2010- página 5)
- [45] – Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Separação Ciclónica*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Setembro de 2010 - página 6)
- [46] – [http://www.fmdaircontrol.com/cyclone\\_separators.jpg](http://www.fmdaircontrol.com/cyclone_separators.jpg) (Consultado em Setembro de 2010)

- [47] – [http://images.quebarato.com.br/T440x/ciclone+e+hidrociclone\\_11D9F3\\_1.jpg](http://images.quebarato.com.br/T440x/ciclone+e+hidrociclone_11D9F3_1.jpg)  
(Consultado em Outubro de 2010)
- [48] – Adaptado de: Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Separação Ciclónica*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Outubro de 2010- página 7)
- [49] – Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Separação Ciclónica*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Outubro de 2010- página 8)
- [50] – Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Separação Ciclónica*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Outubro de 2010- página 10)
- [51] – Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Separação Ciclónica*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Outubro de 2010- página 12)
- [52] – Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Separação Ciclónica*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Outubro de 2010- página 13)
- [53] – Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Separação Ciclónica*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Outubro de 2010- página 14)
- [54] – [http://www.google.pt/images?q=filtros+de+mangas&um=1&hl=pt-PT&rlz=1W1ASUS\\_pt-PT&tbs=isch:1&ei=mjFYTKGDHNWiOIagjMoJ&sa=N&start=20&ndsp=20](http://www.google.pt/images?q=filtros+de+mangas&um=1&hl=pt-PT&rlz=1W1ASUS_pt-PT&tbs=isch:1&ei=mjFYTKGDHNWiOIagjMoJ&sa=N&start=20&ndsp=20)  
(Consultado em Outubro de 2010)
- [55] [http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://www.bernauer.com.br/img/products/filtros/mangas\\_fb/FB\\_Online.jpg&imgrefurl=http://www.bernauer.com.br/Product.aspx%3Fid%3D21%26typeid%3D2&usq=CauW9wEIqBFa4aSeibmP7I2QpYg=&h=359&w=350&sz=26&hl=pt-pt&start=10&zoom=1&um=1&itbs=1&tbnid=YyoZLHOwVDVcgM:&tbnh=121&tbnw=118&prev=/images%3Fq%3Dcaldeira%252Bmulticiclone%252Bfitro%2Bde%2Bm](http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://www.bernauer.com.br/img/products/filtros/mangas_fb/FB_Online.jpg&imgrefurl=http://www.bernauer.com.br/Product.aspx%3Fid%3D21%26typeid%3D2&usq=CauW9wEIqBFa4aSeibmP7I2QpYg=&h=359&w=350&sz=26&hl=pt-pt&start=10&zoom=1&um=1&itbs=1&tbnid=YyoZLHOwVDVcgM:&tbnh=121&tbnw=118&prev=/images%3Fq%3Dcaldeira%252Bmulticiclone%252Bfitro%2Bde%2Bm)

[angas%26um%3D1%26hl%3Dpt-pt%26sa%3DN%26rlz%3D1R2ASUS\\_pt-](#)

[PT%26tbs%3Disch:1](#) (Consultado em Outubro de 2010)

[56] – Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Filtração Seca*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Novembro de 2010- página 5)

[57] – Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Filtração Seca*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Novembro de 2010- página 7)

[58] – Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Filtração Seca*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Novembro de 2010- página 7)

[59]–[http://www.ascojoucomatic.nl/images/site/upload/\\_pt/pdf1/X003japt.pdf](http://www.ascojoucomatic.nl/images/site/upload/_pt/pdf1/X003japt.pdf)

(Consultado em Novembro de 2010)

[60] – Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Filtração Seca*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Novembro de 2010- página 14)

[61] – Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Filtração Seca*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Novembro de 2010- página 14)

[62] – Adaptado a partir de: Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Filtração Seca*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Novembro de 2010- página 15)

[63] – Adaptado de:

[http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2b/Ciclo\\_rankine\\_AAA.jpg&imgrefurl=http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Ciclo\\_rankine\\_AAA.jpg&h=477&w=680&sz=36&tbnid=9D3XjdH9dx6EUM:&tbnh=98&tbnw=139&prev=/images%3Fq%3Dciclo%2Bde%2Bbrankine&zoom=1&q=ciclo+de+rankine&hl=pt-PT&usq=\\_\\_Vz3CTY9I5nOc-0LOJ9gKJNSgSPs=&sa=X&ei=gDQSTYCyIIql8QOD172EBw&ved=0CCsQ9QEwAw](http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2b/Ciclo_rankine_AAA.jpg&imgrefurl=http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Ciclo_rankine_AAA.jpg&h=477&w=680&sz=36&tbnid=9D3XjdH9dx6EUM:&tbnh=98&tbnw=139&prev=/images%3Fq%3Dciclo%2Bde%2Bbrankine&zoom=1&q=ciclo+de+rankine&hl=pt-PT&usq=__Vz3CTY9I5nOc-0LOJ9gKJNSgSPs=&sa=X&ei=gDQSTYCyIIql8QOD172EBw&ved=0CCsQ9QEwAw) (Consultado em Novembro de 2010)

[64] – Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Separação Ciclónica*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Novembro de 2010)

[65] – Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Separação Ciclónica*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Novembro de 2010)

[66] – [http://images.quebarato.com.br/T440x/ciclone+e+hidrociclone\\_11D9F3\\_2.jpg](http://images.quebarato.com.br/T440x/ciclone+e+hidrociclone_11D9F3_2.jpg) (Consultado em Novembro de 2010)

[67] – Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Filtração Seca*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Novembro de 2010)

[68] – Adaptado de: Juanico, Filipe J. M., (1991); *Geradores de Calor*, Ecemei Lda., Porto e de [http://www.exausfer.com.br/admin/fotos3/imagem16\\_23\\_12\\_1.jpg](http://www.exausfer.com.br/admin/fotos3/imagem16_23_12_1.jpg) (Consultado em Dezembro de 2010)

Outras consultas efectuadas sem referência directa no texto:

- Noel de Nevers; *Air Pollution control Engineering*, Second Edition, McGraw – Hill International Editions, Civil Engineering Series, New York 2000 (Consultado em Novembro e Dezembro de 2010)
- <http://apenergiasrenovaveis.wordpress.com/biomassa/vantagens-e-desvantagens/> (Consultado em Março de 2010)
- <http://www.greenpro.de/po/bioenergia.pdf> (Consultado em Março de 2010)
- <http://pt.wikipedia.org/wiki/Biomassa> (Consultado em Março de 2010)
- [http://www.areas.pt/index.php?view=article&catid=38%3Aartigos&id=55%3Aa-energia-da-biomassa&option=com\\_content&Itemid=62&lang=pt](http://www.areas.pt/index.php?view=article&catid=38%3Aartigos&id=55%3Aa-energia-da-biomassa&option=com_content&Itemid=62&lang=pt) (Consultado em Março de 2010)
- [http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://filipedebarrros.files.wordpress.com/2009/04/biomassa31.jpg&imgrefurl=http://filipedebarrros.wordpress.com/2009/04/26/recursos-energeticos-energias-renovaveisbiomassa/&usq=\\_vqV10W1bGiSrpVGQWYDBjntMp0w=&h=317](http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://filipedebarrros.files.wordpress.com/2009/04/biomassa31.jpg&imgrefurl=http://filipedebarrros.wordpress.com/2009/04/26/recursos-energeticos-energias-renovaveisbiomassa/&usq=_vqV10W1bGiSrpVGQWYDBjntMp0w=&h=317)

- [&w=500&sz=66&hl=pt-PT&start=5&um=1&itbs=1&tbnid=8DZTj1IQSC24hM:&tbnh=82&tbnw=130&prev=/images%3Fq%3Dtipos%2Bde%2Bbiomassa%26um%3D1%26hl%3Dpt-PT%26rlz%3D1W1ASUS\\_pt-PT%26tbs%3Disch:1](#) (Consultado em Março de 2010)
- <http://www.energiasealternativas.com/extrair-energia-biomassa.html> (Consultado em Março de 2010)
  - <http://www.bv.fapesp.br/projetos-regulares/3159/pirolise-rapida-biomassa-vegetal-estudo-fluidodinamica/> (Consultado em Março de 2010)
  - [http://paginas.fe.up.pt/~fmb/PTE2/Apontamentos%20PTE2/PTE2\\_Biomassa.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~fmb/PTE2/Apontamentos%20PTE2/PTE2_Biomassa.pdf) (Consultado em Março de 2010)
  - [http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://www.koalaenergy.com.br/img/pellets\\_ciclo.jpg&imgrefurl=http://www.koalaenergy.com.br/pellets.php&usq= aNgvEcXoysTWzB0bg5eRJ1qqs4U=&h=370&w=479&sz=44&hl=pt-PT&start=35&itbs=1&tbnid=Nu4QYCn0qd-npM:&tbnh=100&tbnw=129&prev=/images%3Fq%3DPRODU%25C3%2587%25C3%2583O%2BINDUSTRIAL%2BDE%2BPELLETS%2BDE%2BMADEIRA%26start%3D18%26hl%3Dpt-PT%26sa%3DN%26gbv%3D2%26ndsp%3D18%26tbs%3Disch:1](http://www.google.pt/imgres?imgurl=http://www.koalaenergy.com.br/img/pellets_ciclo.jpg&imgrefurl=http://www.koalaenergy.com.br/pellets.php&usq= aNgvEcXoysTWzB0bg5eRJ1qqs4U=&h=370&w=479&sz=44&hl=pt-PT&start=35&itbs=1&tbnid=Nu4QYCn0qd-npM:&tbnh=100&tbnw=129&prev=/images%3Fq%3DPRODU%25C3%2587%25C3%2583O%2BINDUSTRIAL%2BDE%2BPELLETS%2BDE%2BMADEIRA%26start%3D18%26hl%3Dpt-PT%26sa%3DN%26gbv%3D2%26ndsp%3D18%26tbs%3Disch:1) (Consultado em Abril de 2010)
  - <http://images.engenhariagilberto.multiply.multiplycontent.com/attachment/0/Rbc3JAoKCrgAAAug5g1/Comb-Cap7.pdf?nmid=18676170> (Consultado em Abril de 2010)
  - <http://wiki.advfn.com/pt/Biomassa> (Consultado em Abril de 2010)
  - [http://www.slideshare.net/florindo\\_sousa/biomassa-florestal](http://www.slideshare.net/florindo_sousa/biomassa-florestal) (Consultado em Abril de 2010)
  - [http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID\\_conteudo=2&ID\\_area=2&ID\\_sub\\_area=2](http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID_conteudo=2&ID_area=2&ID_sub_area=2) (Consultado em Abril de 2010)
  - <http://www.biodieselbr.com/biodiesel/biodiesel.htm> (Consultado em Abril de 2010)

- [http://www.google.pt/search?hl=pt-PT&rlz=1W1ASUS\\_pt-PT&q=aquecimento+a+biomassa+em+grandes+edificios&aq=f&aqi=&aql=&oq=&gs\\_rfai=](http://www.google.pt/search?hl=pt-PT&rlz=1W1ASUS_pt-PT&q=aquecimento+a+biomassa+em+grandes+edificios&aq=f&aqi=&aql=&oq=&gs_rfai=) (Consultado em Abril de 2010)
- [http://www.google.pt/images?um=1&hl=pt-PT&rlz=1W1ASUS\\_pt-PT&tbs=isch:1&&sa=X&ei=pxYSTI3hE5jBsgbOh-GvBQ&ved=0CB8QBSgA&q=despoeiradores+ciclones&spell=1](http://www.google.pt/images?um=1&hl=pt-PT&rlz=1W1ASUS_pt-PT&tbs=isch:1&&sa=X&ei=pxYSTI3hE5jBsgbOh-GvBQ&ved=0CB8QBSgA&q=despoeiradores+ciclones&spell=1) (Consultado em Abril de 2010)
- <http://146.164.33.61/silviocarlos/pesquisa/Gaseifica%E7%E3o%20de%20Biomassa%20Uma%20An%E1lise%20Te%F3rica%20e%20Experimental.pdf> (Consultado em Maio de 2010)
- [http://web.ist.utl.pt/luis.roriz/MyPage/et\\_T11.htm](http://web.ist.utl.pt/luis.roriz/MyPage/et_T11.htm) (Consultado em Maio de 2010)
- [http://www.centrodabiomassa.pt/images/stories/documentos/brochure\\_pt\\_tek.pdf](http://www.centrodabiomassa.pt/images/stories/documentos/brochure_pt_tek.pdf) (Consultado em Maio de 2010)
- <http://www.centrodabiomassa.pt/index.php/documentos> (Consultado em Maio de 2010)
- <http://www.centrodabiomassa.pt/images/stories/documentos/A%20biomassa%20florestal%20Lisboa%20Nov2009.pdf> (Consultado em Maio de 2010)
- <http://www.ecotechsystem.com.br/downloads/catalogos/Filtros%20de%20Mangas-R2.pdf> (Consultado em Maio de 2010)
- [http://www.consultoriaambiental.com.br/artigos/controle\\_de\\_poluicao\\_do\\_ar.pdf](http://www.consultoriaambiental.com.br/artigos/controle_de_poluicao_do_ar.pdf) (Consultado em Junho de 2010)
- [http://www.universoambiental.com.br/novo/artigos\\_ler.php?canal=5&canallocal=6&canalsub2=16&id=44](http://www.universoambiental.com.br/novo/artigos_ler.php?canal=5&canallocal=6&canalsub2=16&id=44) (Consultado em Junho de 2010)
- <http://www.lcgar.ufsc.br/adm/aula/Cap%207%20MetControle%20PATM.pdf> (Consultado em Junho de 2010)
- <http://www.wgui.com.br/precipitador.php> (Consultado em Junho de 2010)
- [http://www.hamon.com.br/prod\\_esp\\_func.htm](http://www.hamon.com.br/prod_esp_func.htm) (Consultado em Junho de 2010)
- [http://www.inf.ufes.br/~neyval/Rec\\_At\(moduloVI\).pdf](http://www.inf.ufes.br/~neyval/Rec_At(moduloVI).pdf) (Consultado em Julho de 2010)

- <http://pt.shvoong.com/exact-sciences/engineering/1763557-filtros-mangas-para-desempoeiramento-instala%C3%A7%C3%B5es/> (Consultado em Julho de 2010)
- [http://www.hamon.com.br/prod\\_esp\\_func.htm](http://www.hamon.com.br/prod_esp_func.htm) (Consultado em Agosto de 2010)
- <http://www.ticel.ind.br/mangas.html> (Consultado em Agosto de 2010)
- [http://www.ascojoucomatic.nl/images/site/upload/\\_pt/pdf1/X003japt.pdf](http://www.ascojoucomatic.nl/images/site/upload/_pt/pdf1/X003japt.pdf) (Consultado em Setembro de 2010)
- [http://www.deltaducon.com.br/produtos/\\_tipos\\_mangas.html](http://www.deltaducon.com.br/produtos/_tipos_mangas.html) (Consultado em Setembro de 2010)
- <http://filtrodemangas.com/> (Consultado em Setembro de 2010)
- <http://www.prefer.pt/index.php?show=solucoes2&family=85> (Consultado em Outubro de 2010)
- [http://www.ventec.com.br/downloads/manuais\\_ventec/alt27-10-08/Manual\\_Filtro\\_de\\_Mangas.pdf](http://www.ventec.com.br/downloads/manuais_ventec/alt27-10-08/Manual_Filtro_de_Mangas.pdf) (Consultado em Outubro de 2010)
- <http://www.nest.unifei.edu.br/english/pags/downloads/files/STAB-2.pdf> (Consultado em Outubro de 2010)
- <http://www.quimicaderivados.com.br/revista/qd407/filtros1.htm> (Consultado em Outubro de 2010)
- [http://web.ist.utl.pt/luis.roriz/MyPage/et\\_T11.htm](http://web.ist.utl.pt/luis.roriz/MyPage/et_T11.htm) (Consultado em Novembro de 2010)
- <http://www.infosolda.com.br/download/13ddp.pdf> (Consultado em Novembro de 2010)
- [http://www.drapc.min-agricultura.pt/base/geral/files/mercado\\_aproveitamento.pdf](http://www.drapc.min-agricultura.pt/base/geral/files/mercado_aproveitamento.pdf) (Consultado em Novembro de 2010)
- Juanico, Filipe J. M., (1991); *Geradores de Calor*, Ecemei Lda., Porto (Consultado em Julho, Novembro e Dezembro de 2010)
- Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Separação Ciclónica*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Setembro, Outubro e Novembro de 2010)

- Fernando J. M., Antunes Pereira, M. Arlindo A. Matos, (2007); *Filtração Seca*, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Consultado em Setembro, Outubro e Novembro de 2010)
- Decreto – Lei n.º 78/2004 de 3 de Abril (Consultado em Novembro de 2010)
- Decreto – Lei n.º 128/2010 de 3 de Dezembro (Consultado em Dezembro de 2010)
- Portaria n.º 675/2009 de 23 de Junho (Consultado em Novembro de 2010)
- Portaria n.º 676/2009 de 23 de Junho (Consultado em Novembro de 2010)
- Portaria n.º 677/2009 de 23 de Junho (Consultado em Novembro de 2010)

# **Anexo**

Dados fornecidos pela Central Termoeléctrica de Biomassa de Belmonte:

### **SISTEMA DE TRATAMENTO DE FUMOS**

O sistema proposto será composto pelos seguintes equipamentos, instalados a jusante da caldeira:

#### **MULTICICLONE**

São aparelhos de captação mecânica de partículas pulverulentas conseguidas pelas acções dinâmicas a que é submetido o fluxo gasoso na sua passagem pelos tubos de despeiramento.

A sua eficácia é bastante superior à dos ciclones clássicos de grande diâmetro, pois as variações de perda de carga não o afectam com tanta intensidade.

Unicamente são retiradas partículas inferiores a 40  $\mu$ , sendo o rendimento de captação de 100% para partículas de 25  $\mu$  e de 95% para partículas de 10  $\mu$ . Abaixo deste valor de granulometria o rendimento do multiciclone baixa naturalmente não sendo de considerar a captação de partículas inferiores a 2  $\mu$ .

#### **Constituição do aparelho**

Os tubos de captação são dispostos num corpo ou gaveta de tubos. Esta é montada numa caixa que constitui o corpo da máquina, tendo possibilidade de desmontagem por desaperto de parafusos. Este corpo é encimado pelas condutas da chegada de gases poluídos e condutas de saída de gases limpos, desmontáveis.

Ligada à parte inferior do corpo está a tulha dupla de descarga das partículas retiradas à veia fluídica. Um dos compartimentos desta tulha destina-se ao armazenamento das partículas de maior granulometria separadas pela chapa de choque existente na gaveta de tubos; o outro compartimento destina-se ao armazenamento das partículas de menor granulometria separadas dos tubos ciclones. Esta tulha possui uma porta de descarga e é também desmontável.

Para obviar ao inconveniente da perda de carga introduzida pela máquina, é montado um grupo motoventilador de acoplamento indirecto, que aspira os gases do eliminador de fuligem e os comprime para a chaminé existente.

Na conduta de ligação do aparelho ao ventilador é montado um sistema de seccionamento da veia fluídica, accionado geralmente por válvula electromagnética.

Todo este conjunto é montado sobre uma estrutura, de modo a serem facilmente retirados os detritos captados e armazenados na tulha dupla, para um carrinho de transporte. Esta estrutura pode não existir nos modelos de reduzida dimensão, que serão suportados pelas próprias condutas de gases.

**- Válvulas de guilhotina de comando pneumático**

- 2 Válvulas de guilhotina de comando pneumático ISOLAMENTO (IN / OUT FILTRO)
- 2 Válvulas de guilhotina de comando pneumático BY-PASS FILTRO
- 1 Válvula guilhotina de comando pneumático ARREFECIMENTO FILTRO

**- Sistema contra incêndio**

Inclui um bloco de detecção de faísca em conduta com sistema automático de injeção de água pulverizada e sinal disponível de alarme e possível by-pass do filtro.

- Célula de detecção de chama "faísca"
- Rampa pulverizadora de água
- Electroválvulas de abertura de água automática
- Caixa electrónica de comando

**- Armário eléctrico geral de protecção e comando**

Inclui um armário geral de protecção e comando de todos os elementos abaixo indicados acrescido de variação de velocidade para o ventilador

- Potência instalada motoventilador principal
- Potência instalada motoventilador insuflação caldeira
- Potência instalada (válvula rotativa) 2 x 0,55 kW
- 2 Sonda PT100
- Comando sistema limpeza filtro
- Visualização perda de carga filtro
- Comando sistema de segurança contra incêndio
- Comando válvulas de by-pass diversos
- Emergências
- Integração no autómato geral

Fornecimento de ar comprimido seco  
Condutas e acessórios  
Cabos e caminhos de cabos necessários  
Aquecimento das paredes do ciclone e tremonha filtro  
Isolamento térmico das paredes ciclone e filtro  
Cobertura topo filtro

**- FILTRO DE MANGAS DAC (Filtro SET-JET (48x12) x (2 / 2,5 - 1.152 m<sup>2</sup>))**

**Características técnicas:**

- Caudal de ar a tratar máximo:	30.500 Nm <sup>3</sup> /h a 140 °C
- Caudal previsto:	45.000 m <sup>3</sup> /h
- Temperatura de funcionamento prevista:	140 °C
- Temperatura máxima admitida:	180 °C
- Picos de pouca duração:	210 °C
- Área filtrante instalada:	850 m <sup>2</sup>
- Taxa de trabalho:	85 m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup>
- Velocidade ascensional:	< 1 m/s
- Número de mangas filtrantes:	864
- Número de manequins em aço inox AISI 316L:	864
- Número de rampas de mangas:	72
- Número de mangas por rampa:	12
- Tipo de mangas:	D.N Ø127x2.500 mm
- Fibra utilizada:	100 % Nomex
- Densidade:	550 gr/m <sup>2</sup>
- Número de electroválvulas e passa muros:	96 (SCE 24 VDC)
- Perda de carga máxima admitida:	120 mmca ✓
- Perda de carga nas mangas normal:	< 100 mmca ✓
- Pressão de serviço no reservatório (min):	5,5 bar
- Consumo estimado:	120 - 140 Nm <sup>3</sup> /h
- Timer:	Sim
- Dimensões (L x C x A)	5.320x10.100x10.600mm
- Válvula rotativa de estanqueidade:	2x0,55 kW

**- GRUPO MOTOVENTILADOR PRINCIPAL (saída filtro)**

• Ventilador	ABB / SOLYVENT, ou equivalente
• Modelo	Centrifugo
• Transmissão	Acoplamento
• Caudal Nominal	$\pm 30.500 \text{ m}^3/\text{h}$ a $140 \text{ }^\circ\text{C}$
• Caudal de ar a tratar máximo	$45.000 \text{ m}^3/\text{h}$
• Pressão total ventilador a $140 \text{ }^\circ\text{C}$	450 mmca
• Pressão total ventilador a $20 \text{ }^\circ\text{C}$	740 mmca
• Potência absorvida a $140 \text{ }^\circ\text{C}$	78 kW
• Potência absorvida a $20 \text{ }^\circ\text{C}$	192 kW
• Potência instalada	110 kW
• Velocidade de rotação	$\approx 1.450 \text{ rpm}$
• Turbina de arrefecimento	SIM

**- EQUIPAMENTO DIVERSO E CONDUTAS DE LIGAÇÃO ENTRE A CALDEIRA E OS EQUIPAMENTOS ATRÁS DESCRITOS**

O sistema foi previsto para as seguintes condições de base:

Caudal máximo ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ )	30.500
Caudal máximo existente ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	45.000
Depressão entrada ventilador (máxima / mmca)	450
Temperatura máxima ( $^\circ\text{C}$ )	160

- Condutas e acessórios de ligação para os seguintes traçados:
  - Ligação da caldeira - ciclone ( $\pm \text{Ø } 1.200$ )
  - Ligação ciclone, câmara de decantação e entrada filtro
  - Ligação saída do filtro para entrada de ventilador
  - Saída ventilador para chaminé ( $\text{Ø } 1.200$ )
  - Conduta de by-pass entre entrada filtro e entrada ventilador ( $\pm \text{Ø } 1.000$ )
  - Condutas de adaptação às válvulas de guilhotina de by-pass e válvula diluição ar filtro
- Isolamento térmico com lã mineral ( $80\text{mm}/70 \text{ kg}/\text{dm}^3$ ) revestido em chapa ( $0,8\text{mm}$ ) do filtro
- Cobertura superior do filtro
- Fornecimento de ar comprimido seco e à pressão min de 5,5 bar para limpeza do filtro e accionamento das válvulas guilhotina
- Fornecimento de rede de ar comprimido e acessórios
- Fornecimento de armário eléctrico de protecção e comando de todos os equipamentos que será integrado no geral.
- Fornecimento e montagem de cabos e caminhos necessários.
- Resistências de aquecimento do ciclone e tremonha filtro.