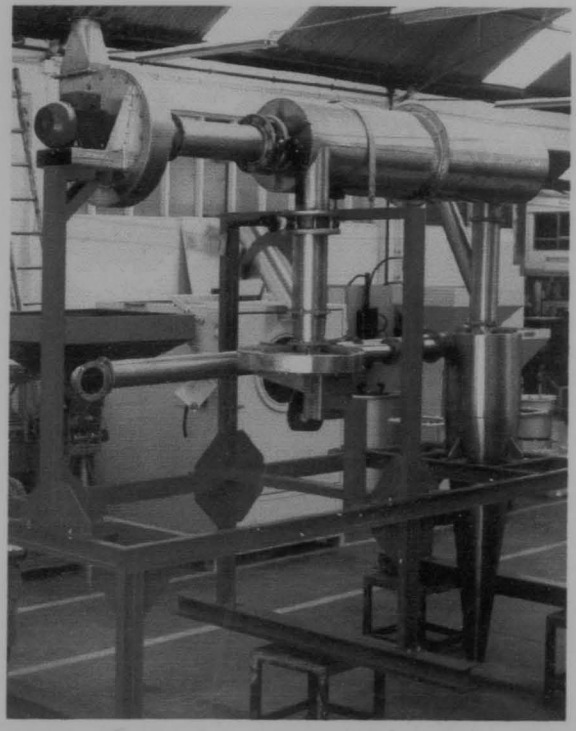
Andreia Cristina dos Santos Pereira
Departamento de Engenharia Química da FEUP
Relatório PRODEP

CICLONE RS_VHE

E

SISTEMA DE RECIRCULAÇÃO

Estudo à Escala Piloto



Dezembro de 2000

66(047.3)
LEQ 1999/PERa

UNIÃO EUROPEIA
Fundo Social Europeu
prodep III
Mais Educação

Andreia Cristina dos Santos Pereira
Departamento de Engenharia Química da FEUP
Relatório PRODEP

CICLONE RS_VHE

E

SISTEMA DE RECIRCULAÇÃO

Estudo à Escala Piloto



Dezembro de 2000

66(047.3)/LEQ 1999/PERa
Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
Biblioteca
Nº 88493
CDU 628.511(047.3)
Data 23/04/2007

AGRADECIMENTOS

Pelo auxílio no esclarecimento de dúvidas e na orientação do projecto, e pela disponibilização de instalações e meios de trabalho, agradeço ao Director do Projecto Dr. Romualdo Salcedo.

Pelo apoio prestado no local onde se desenrolou a parte experimental do projecto, agradeço aos profissionais da QUIMIGAL, em geral, e à Engª Susana Pereira e Engº Miguel Saraiva, em particular.

Pela paciência e compreensão, os mais sinceros agradecimentos aos familiares e amigos.

Pela partilha de tarefas e discussão de ideias aquando da execução do projecto e pela presença constante nos bons e maus momentos, agradeço à Maria, que acima de tudo se revelou uma amiga na verdadeira acepção da palavra. Espero que continues a habitar no meu mundo...

Frequência do Ventilador Auxiliar de 50Hz 90
5.1.6 Determinação do Perfil de Velocidades à saída da Chaminéda Unidade de Ácido Sulfanílico da QUIMIGAL *98*
5.2 DETERMINAÇÃO DE EFICIÊNCIAS 99
5.2.1 Determinação de Eficiências Globais *100*
5.2.1.1 Sistema sem Recirculação 103
5.2.1.2 Sistema com Recirculação 104
5.2.1.3 Análise Conjunta dos Resultados 105
5.2.2 Determinação de Eficiências Fraccionais *107*
5.2.2.1 Sistema sem Recirculação 108
5.2.2.2 Sistema com Recirculação 115
5.2.2.3 Análise Conjunta dos Resultados 125

6 CONCLUSÕES 141

7 ANEXO A – CONCEITOS BÁSICOS SOBRE AMOSTRAGEM ISOCINÉTICA 143

8 ANEXO B – RELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE E CONCENTRAÇÃO NO MONITOR DE CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS FW 56-I 145

9 ANEXO C – DADOS PARA A DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES 146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação das dimensões das partículas 14
Figura 2 – Câmara de sedimentação 16
Figura 3 – Ciclone 17
Figura 4 – Precipitador dinâmico 18
Figura 5 – Torre de lavagem de gases 19
Figura 6 – Ciclone por via húmida 20
Figura 7 – Lavadores de gases com efeito Venturi 21
Figura 8 – Filtros de mangas 22
Figura 9 – Precipitadores electrostáticos 23
Figura 10 – Separador rotativo de partículas 28
Figura 11 – Filtro rotativo 28
Figura 12 – Equilíbrio dinâmico no interior do filtro tubular 29
Figura 13 – Eficiência de recolha de partículas *versus* velocidade de entrada no ciclone 31
Figura 14 – a) Ciclone simples e b) Ciclone com recirculação 31
Figura 15 – Sistema combinado de recirculador e ciclone a jusante 32
Figura 16 – Eficiência do concentrador em função do diâmetro das partículas 32
Figura 17 – Esquema concentrador + ciclone 33
Figura 18 – Eficiência de remoção de partículas finas nas técnicas convencionais 35
Figura 20 – Eficiência global versus eficiência do separador e eficiência do ciclone no sistema concentrador+ciclone 36
Figura 21 – Eficiência global versus eficiência do separador e eficiência do ciclone no sistema ciclone+concentrador 36
Figura 22 – Diagrama de um ciclone de fluxo invertido 39
Figura 23 – Acabamento da unidade piloto na Azevedos Indústria, SA 45
Figura 24 – Unidade piloto acabada na Azevedos Indústria, SA 46
Figura 25 – Quadro eléctrico e unidades de avaliação dos opacímetros SICK 47
Figura 26 – Vista dos tubos de entrada (inferior) e de saída (superior), opacímetros e unidades de conversão A/D de pressão diferencial no ciclone e sistema 48
Figura 27 – Unidades de pressão diferencial para o ciclone e o sistema de recirculação 48
Figura 28 – Pontos de amostragem de pressão estática 49
Figura 29 – Vista lateral da instalação piloto com ventilador principal e de recirculação 49
Figura 30 – Vista da parte inferior do ciclone com receptáculo de recolha 50
Figura 31 – Pormenor do receptáculo de recolha com janela de visita 50
Figura 32 – Fotografia da equipa técnica afecta ao projecto 51
Figura 33 – Fotografia do director do projecto 51
Figura 34 – Esquema do aparelho de medição 58
Figura 35 – Esquema detalhado do aparelho de medição 59
Figura 36 – Concentração mássica *versus* extinção 62
Figura 37 – Recolha de informação experimental 70
Figura 38 – Caudal mássico de gás *versus* frequência do ventilador principal 71
Figura 39 – Declive das rectas de ajuste da Figura 2 em função da f_{aux} 72
Figura 40 – Temperatura *versus* caudal volumétrico no ciclone 73
Figura 41 – Humidade *versus* caudal volumétrico no ciclone 74
Figura 42 – Queda de pressão no ciclone e no recirculador *versus* caudal no ciclone (sem recirculação) 76
Figura 43 – Queda de pressão no ciclone e no recirculador *versus* caudal no ciclone (F_{prin} = 50Hz) 77
Figura 44 – Queda de pressão no ciclone e no recirculador *versus* caudal no ciclone (F_{aux} = 50Hz) 78
Figura 45 – Corte transversal da tubagem e pontos de amostragem de velocidade à entrada e à saída do sistema 79
Figura 46 – Corte transversal da tubagem e pontos de amostragem de velocidade à saída do recirculador 79
Figura 47 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=30Hz, f_{aux}=0Hz) 82
Figura 48 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=30Hz, f_{aux}=0Hz) 82
Figura 49 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=0Hz) 83
Figura 50 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=0Hz) 83
Figura 51 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=0Hz) 84

Figura 52 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=0Hz) 84
Figura 53 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=0Hz) 85
Figura 54 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=0Hz) 85
Figura 55 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=20Hz) 86
Figura 56 – Perfil de velocidades à saída do recirculador (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=20Hz) 87
Figura 57 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=20Hz) 87
Figura 58 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=30Hz) 88
Figura 59 – Perfil de velocidades à saída do recirculador (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=30Hz) 88
Figura 60 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=30Hz) 89
Figura 61 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=40Hz) 89
Figura 62 – Perfil de velocidades à saída do recirculador (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=40Hz) 90
Figura 63 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=50Hz) 90
Figura 64 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=50Hz) 91
Figura 65 – Perfil de velocidades à saída do recirculador (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=50Hz) 91
Figura 66 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=50Hz) 92
Figura 67 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=50Hz) 92
Figura 68 – Perfil de velocidades à saída do recirculador (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=50Hz) 93
Figura 69 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=50Hz) 93
Figura 70 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=50Hz) 94
Figura 71 – Perfil de velocidades à saída do recirculador (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=50Hz) 94
Figura 72 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=50Hz) 95
Figura 73 – Perfil de velocidade na chaminé da unidade de ácido sulfanílico da QUIMIGAL 99
Figura 74 – Corte transversal da tubagem e pontos de amostragem isocinética à entrada e à saída do sistema 100
Figura 75 – Corte transversal da tubagem e pontos de amostragem isocinética à saída do recirculador 100
Figura 76 – Eficiência global *versus* caudal do ciclone sem recirculação 103
Figura 77 – Eficiência global *versus* caudal do ciclone com recirculação 105
Figura 78 – Penetração *versus* queda de pressão no ciclone 106
Figura 79 – Penetração *versus* velocidade à entrada no ciclone 107
Figura 80 – Distribuição em volume (f_{prin}=30Hz, f_{aux}=0Hz) 109
Figura 81 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=30Hz, f_{aux}=0Hz) 109
Figura 82 – Eficiências fraccionais - experimental e teórica (f_{prin}=30Hz, f_{aux}=0Hz) 110
Figura 83 – Distribuição em volume (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=0Hz) 110
Figura 84 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=0Hz) 110
Figura 85 – Eficiências fraccionais - experimental e teórica (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=0Hz) 111
Figura 86 – Distribuição em volume (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=0Hz) 111
Figura 87 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=0Hz) 112
Figura 88 – Eficiências fraccionais - experimental e teórica (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=0Hz) 112
Figura 89 – Distribuição em volume (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=0Hz) 113
Figura 90 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=0Hz) 113
Figura 91 – Eficiências fraccionais - experimental e teórica (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=0Hz) 113
Figura 92 – Distribuição em volume (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=20Hz) 115
Figura 93 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=20Hz) 116
Figura 94 – Eficiências fraccionais - experimental (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=20Hz) 116
Figura 95 – Distribuição em volume (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=30Hz) 117
Figura 96 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=30Hz) 117
Figura 97 – Eficiências fraccionais - experimental (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=30Hz) 118
Figura 98 – Distribuição em volume (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=40Hz) 118
Figura 99 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=40Hz) 119
Figura 100 – Eficiências fraccionais - experimental (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=40Hz) 119
Figura 101 – Distribuição em volume (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=50Hz) 120
Figura 102 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=50Hz) 120
Figura 103 – Eficiências fraccionais - experimental (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=50Hz) 121
Figura 104 – Distribuição em volume (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=50Hz) 121
Figura 105 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=50Hz) 122
Figura 106 – Eficiências fraccionais - experimental (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=50Hz) 122
Figura 107 – Distribuição em volume (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=50Hz) 123
Figura 108 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=50Hz) 123

Figura 109 – Eficiências fraccionais - experimental (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=50Hz) 124
Figura 110 – Distribuição em volume, com e sem recirculação, à entrada 125
Figura 111 – Média aritmética e desvio padrão dos dados da Figura 110 126
Figura 112 – Derivada da distribuição cumulativa, com e sem recirculação, à entrada 126
Figura 113 – Média aritmética e desvio padrão dos dados da Figura 112 127
Figura 114 – Distribuição em volume, sem recirculação, à saída 128
Figura 115 – Média aritmética e desvio padrão dos dados da Figura 114 128
Figura 116 – Derivada da distribuição cumulativa, sem recirculação, à saída 129
Figura 117 – Média aritmética e desvio padrão dos dados da Figura 116 130
Figura 118 – Distribuição em volume, com recirculação, à saída 131
Figura 119 – Derivada da distribuição cumulativa, com recirculação, à saída 131
Figura 120 – Derivada da distribuição cumulativa, com e sem recirculação, na recuperação 132
Figura 121 – Média aritmética e desvio padrão dos dados da Figura 120 133
Figura 122 – Derivada da distribuição cumulativa, com e sem recirculação, na recuperação 133
Figura 123 – Média aritmética e desvio padrão dos dados da Figura 122 134
Figura 124 – Média da distribuição em volume no ciclone e filtro da QUIMIGAL e no ciclone RS_VHE 135
Figura 125 – Média da derivada da distribuição cumulativa no ciclone e filtro da QUIMIGAL e no ciclone RS_VHE 135
Figura 126 – Penetração *versus* mediana de distribuição à saída 136
Figura 127 – Penetração *versus* moda de distribuição à saída 137
Figura 128 – Penetração *versus* eficiência de recirculação 137
Figura 129 – Eficiência mínima *versus* eficiência de recirculação 138
Figura 130 – Quedas de pressão, sem recirculação, *versus* diâmetro de corte 139
Figura 131 – Concentração *versus* intensidade à entrada no sistema 145
Figura 132 – Concentração *versus* intensidade à saída 145

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Valores fixados pela Legislação, Portaria nº 286/93 de 12 de Março (Anexo IV) 13
Tabela 2 – Características gerais dos sistemas de separação de partículas 24
Tabela 3 – Comparação dos sistemas de recuperação de partículas finas 26
Tabela 4 – Tarefas e resultados parciais do projecto 44
Tabela 5 – Diagrama de Gantt proposto e aprovado 52
Tabela 6 – Características das condutas da instalação 54
Tabela 7 – Intervalo de valores das variáveis medidas pelo equipamento 63
Tabela 8 – Precisões do equipamento 63
Tabela 9 – Número mínimo de pontos de amostragem para condutas circulares 65
Tabela 10 – Relação entre as frequências dos ventiladores e o caudal mássico de gás à entrada do ciclone 72
Tabela 11 – Média e desvio padrão das T_{ent}, T_{sai} e T_{rec} 73
Tabela 12 – Média e desvio padrão das H_{ent}, H_{sai} e H_{rec} 74
Tabela 13 – Valores de humidade absoluta 75
Tabela 14– Média e desvio padrão das H_{ent}, H_{sai} e H_{rec} 75
Tabela 15 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=30Hz, f_{aux}=0Hz) 82
Tabela 16 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=0Hz) 83
Tabela 17 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=0Hz) 84
Tabela 18 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=0Hz) 85
Tabela 19 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=20Hz) 87
Tabela 20 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=30Hz) 89
Tabela 21 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=50Hz) 90
Tabela 22 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=50Hz) 92
Tabela 23 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=50Hz) 93
Tabela 24 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=50Hz) 95
Tabela 25 – Velocidade média e caudais volúmico e mássico do gás em todos os ensaios 97
Tabela 26 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico 99
Tabela 27 – Eficiência isocinética sem recirculação 101
Tabela 28 – Eficiência isocinética com recirculação 102
Tabela 29 – Eficiências globais sem recirculação 103
Tabela 30 – Eficiências globais (com recirculação) 104

1 OBJECTIVOS

O desenvolvimento e implementação de uma instalação à escala piloto teve como objectivo a verificação do comportamento do ciclone RS_VHE, a funcionar sem e com recirculação parcial, para captura à escala industrial de poeiras de tamanho reduzido.

O desempenho deste tipo de unidades processuais é apreciado com base no cálculo de eficiências, tanto globais, como fraccionais, avaliando estas últimas a resposta do ciclone quando sujeito a partículas de diferentes diâmetros. Para atingir esse objectivo, foram definidos vários passos que visavam a caracterização do fluído relativamente às suas propriedades (temperatura, humidade e densidade) e ao regime de transporte a que estava sujeito (velocidade).

O projecto realizado incluiu duas etapas fundamentais. A primeira decorreu nas instalações da QUIMIGAL, nomeadamente na fábrica de produção de ácido sulfanílico e envolveu a recolha de dados experimentais. A segunda consistiu na elaboração de um relatório final que caracterizasse a situação actual no que diz respeito ao tratamento de efluentes gasosos, bem como a avaliação do desempenho do ciclone RS_VHE através da análise dos resultados obtidos.

2 ASPECTOS GERAIS

2.1 Introdução

Num passado não muito longínquo a Humanidade deu-se ao luxo de extrair, produzir e consumir, sem se preocupar com a concorrência e o desperdício. Os recursos naturais pareciam inesgotáveis e os mercados impermeáveis. Este processo, porém, mudou irreversivelmente, transformando o progresso quase forçado em evolução quase caótica.

A natureza, que assimilava sem dificuldade as necessidades de um desenvolvimento controlado, mostra-se hoje totalmente vulnerável às mega-agressões de uma população que cresce de modo exponencial.

Neste momento, ante a total impossibilidade de deter o progresso, só nos resta a alternativa de domá-lo, controlá-lo, adequá-lo, enfim, à sua mais inerente finalidade: o bem estar do ser humano, em equilíbrio com a sua envolvente.

Já não está em causa a necessidade de agir no domínio do ambiente. O debate já não se centra sobre a existência ou não de danos ambientais, mas antes sobre a forma e a rapidez com que estes danos vão afectar a nossa forma de viver. Há um buraco na camada de ozono, os lagos e os rios sofrem os efeitos das chuvas ácidas, e a crescente concentração de certos gases está a provocar o efeito de estufa.

Preservar o ambiente, já não é uma moda de minorias, mas uma necessidade universal para a preservação da nossa espécie.

Os grandes problemas, que podem pôr em risco o futuro da Humanidade, relacionados com o Ambiente, dizem respeito a problemas encontrados ao nível das águas, do ar e dos solos.

O desenvolvimento industrial e urbano tem originado em todo o mundo um aumento crescente da emissão de poluentes atmosféricos. O acréscimo das concentrações atmosféricas destas substâncias, a sua deposição no solo, nos vegetais e nos materiais é responsável por danos na saúde, redução da produção agrícola, danos nas florestas, degradação de construções e obras de arte e de uma forma geral origina desequilíbrios nos ecossistemas.

A luta contra a poluição atmosférica assume hoje em dia um carácter gestionário, dada por um lado, a consideração do "ar" como um recurso natural a preservar e a

utilizar de forma óptima e, por outro, a consideração da importância dos aspectos multidisciplinares a exigir a introdução do verbo "gerir" no processo.

Em Portugal, os problemas de qualidade do ar não afectam o território de uma forma sistemática, encontrando-se localizados em algumas áreas onde é maior a concentração urbana e a presença de grandes unidades industriais (e.g. Sines, Setúbal, Barreiro-Seixal, Lisboa, Estarreja e Porto) [1].

No entanto, a poluição do ar, devido às características da circulação atmosférica e devido à permanência de alguns poluentes na atmosfera por largos períodos de tempo, apresenta um carácter sem fronteira e é responsável por alterações ao nível planetário, o que obriga à conjugação de esforços a nível internacional.

A poluição do ar é causada pela acumulação na atmosfera de substâncias em concentrações tais que geram efeitos nocivos ao Homem e ao Ambiente.

Os principais poluentes do ar são o monóxido de carbono, os hidrocarbonetos, os óxidos de azoto e de enxofre, os oxidantes fotoquímicos e os materiais particulados que, por efeito da sua reduzida granulometria, permanecem em suspensão na atmosfera [1].

A contaminação do ar pode ocorrer a partir de fontes fixas, como as chaminés das indústrias, ou de fontes móveis, representadas por veículos, obras de construção civil, actividades mineiras, entre outras.

A política de preservação e melhoria do ambiente e da defesa da sua qualidade, consignada na Lei de Bases do Ambiente, associada à promoção de um desenvolvimento harmonioso das actividades económicas, constitui o enquadramento de uma política de protecção e melhoria da qualidade do ar [2].

O desenvolvimento económico e social do País tem vindo a provocar sucessivas degradações da qualidade do ambiente, cujos efeitos são particularmente visíveis nas zonas onde esse desenvolvimento tem sido mais acentuado.

Os problemas de poluição atmosférica resultantes do desenvolvimento urbano e industrial e do crescimento da utilização dos veículos automóveis reflectem-se na saúde pública e no bem estar da população e também na preservação da fauna, flora, riquezas paisagísticas e do património histórico e cultural.

São, deste modo, exigidas acções para prevenir ou reduzir os efeitos de degradação da qualidade do ar, o que já foi demonstrado ser compatível com o desenvolvimento industrial e social [3]. A gestão da qualidade do ar envolve a definição de limites de concentração dos poluentes na atmosfera, a limitação de emissões dos mesmos, bem como a intervenção no processo de licenciamento, na criação de estruturas de controlo de poluição em áreas especiais e apoios na implementação de tecnologias menos poluentes.

Atentas a estas circunstâncias, a estratégia de gestão da qualidade do ar em Portugal é definida pelo Decreto-Lei nº 352/90 de 9 de Novembro, traduzindo-se na distinção entre as áreas especiais com densidade significativa das fontes poluidoras e das fontes consideradas pontuais. Trata-se da definição de uma política de preservação e de melhoria da qualidade do ambiente, dando cumprimento à respectiva Lei de Bases quanto ao recurso "ar". Este documento cobre ao mesmo tempo os pressupostos de uma estratégia de controlo da qualidade do "ar respirável" e os de uma estratégia de prevenção centrada na limitação das emissões das fontes poluentes. Os valores limite de concentração de poluentes atmosféricos definem níveis de concentração de poluentes no ar necessários (com uma determinada margem de precaução) para proteger a saúde pública.

Alguns dos valores limite de emissão de aplicação geral, fixados pela legislação portuguesa , são apresentados na Tabela 1 [3].

Tabela 1 – Valores fixados pela Legislação, Portaria nº 286/93 de 12 de Março (Anexo IV)

Limites de emissão de poluentes [mg/m^3N]	
Partículas	300
Dióxido de enxofre (SO_2)	2700
Sulfureto de hidrogénio (H_2S)	50
Óxidos de azoto (No_x), expressos em NO_2	1500
Monóxido de carbono (CO)	1000
Compostos orgânicos, expressos em carbono total	50
Compostos inorgânicos fluorados, expressos em F^-	50
Compostos inorgânicos clorados, expressos em Cl^-	250
Metais pesados totais	8
Cádmio (Cd), Mercúrio (Hg)	0,2
Arsénio (As), Níquel (Ni)	1
Chumbo(Pb), Crómio (Cr), Cobre (Cu)	5

Os materiais partículados, constituídos por fumos e poeiras, estão entre os principais causadores de doenças ocupacionais, como a silicose e a asbestose, e de doenças respiratórias, sendo por isso, um dos poluentes atmosféricos mais estudados. Os materiais partículados são emitidos directamente pelas fontes ou são produzidos na atmosfera em consequência de reacções químicas em fase gasosa.

Na Figura 1 é apresentado um quadro comparativo das dimensões de partículas que podem ocorrer [3].

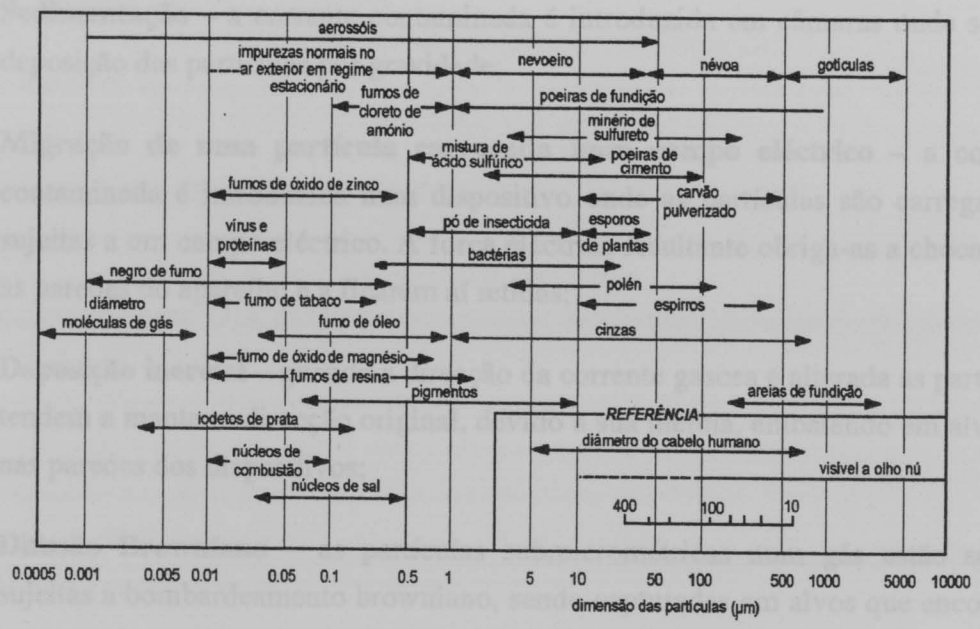


Figura 1 – Classificação das dimensões das partículas

2.2 Caracterização do Estado da Arte

2.2.1 Mecanismos de Controlo de Contaminantes

Originárias de uma variedade de fontes, mas principalmente de processos industriais, as partículas em suspensão exercem uma influência significativa em fenómenos atmosféricos, plantas, propriedades e saúde animal e humana. Em 1980, estimava-se que eram emitidas para a atmosfera cerca de 7,8 milhões de toneladas de matéria de partículas suspensas, das quais 47% do total correspondiam a emissões industriais. O progresso caminha no sentido do controlo das partículas na fonte [1].

É de todo importante o desenvolvimento de mecanismos que permitam controlar a emissão desta forma poluente através da recolha das partículas contaminantes antes da sua emissão para a atmosfera.

2.2.2 Sistemas de Remoção de Partículas de Correntes Gasosas

Os dispositivos de remoção de partículas funcionam pelo princípio de que uma corrente gasosa contendo pequenas partículas sólidas, quando conduzida por um região onde estas são actuadas por forças externas ou obrigadas a interceptar obstáculos se separam do meio gasoso. [5]

Os aparelhos que efectuam a separação de partículas recorrem a diversos mecanismos físicos, que podem funcionar isoladamente ou em conjunto:

- **Sedimentação** – a corrente contaminada é introduzida em câmaras onde se dá a deposição das partículas por gravidade;
- **Migração de uma partícula carregada num campo eléctrico** – a corrente contaminada é introduzida num dispositivo onde as partículas são carregadas e sujeitas a um campo eléctrico. A força eléctrica resultante obriga-as a chocar com as paredes do aparelho e a ficarem aí retidas;
- **Deposição inercial** – quando a direcção da corrente gasosa é alterada as partículas tendem a manter a direcção original, devido à sua inércia, embatendo em alvos ou nas paredes dos dispositivos;
- **Difusão Browniana** – as partículas submicrométricas num gás estão sempre sujeitas a bombardeamento browniano, sendo capturadas em alvos que encontram no seu trajecto.

Seguidamente, são apresentadas diversas tecnologias de controlo de emissões de partículas sólidas, fazendo-se uma breve referência ao seu modo de funcionamento. Estas tecnologias podem ser agrupados segundo cinco grandes grupos [1]:

- câmaras de sedimentação gravítica;
- colectores centrífugos;
- colectores húmidos;
- precipitadores ou filtros electrostáticos;
- filtros físicos;

Cada um destes grupos possui um campo de aplicação específico no qual sobressaem as suas vantagens.

As partículas objecto de controlo, são caracterizadas segundo a sua granulometria, forma, densidade, adesão, higroscopia e características eléctricas. Também são de considerar as características do escoamento gasoso que transporta as partículas na emissão: caudal e concentração das partículas contaminantes.

No processo de selecção e projecto de um equipamento é ainda necessário estabelecer como factores:

- tipo de emissão: contínua ou intermitente;
- eficiência desejada;
- espaço disponível;
- forma de aproveitamento ou recolha do produto da filtragem;
- condições de operação: temperatura e pressão do escoamento, agressividade química;
- custos: inicial, de operação e de manutenção [1].

2.2.2.1 Câmaras de Sedimentação Gravítica

A recolha de partículas de efluentes gasosos pelo efeito da aceleração gravítica é talvez a forma de separação mais obvia.

Uma câmara de sedimentação é uma caixa larga por onde se faz circular uma corrente gasosa onde as partículas desta são sedimentadas no fundo. Para que a deposição aconteça é necessário garantir que a velocidade do fluído seja bastante reduzida. Tal é conseguido com a expansão da conduta onde o gás é transportado para uma câmara muito larga.

A Figura 2 ilustra uma câmara de sedimentação gravitica [4].

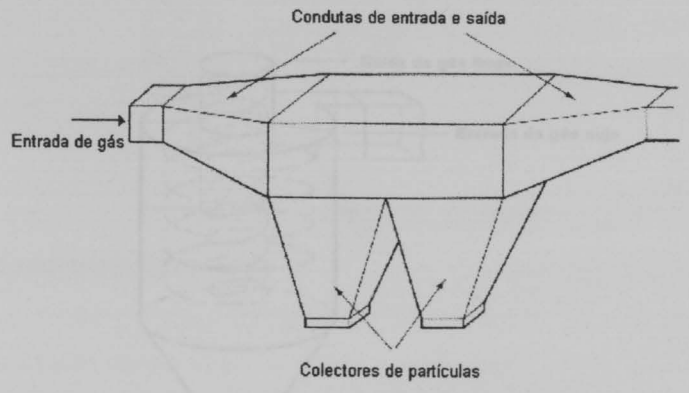


Figura 2 – Câmara de sedimentação

Embora teoricamente, as câmaras de sedimentação fossem capazes de separar todas as partículas, devido a limitações operacionais só é possível sedimentar partículas com dimensões superiores a 50 – 100μm.

Estes dispositivos foram geralmente utilizados na limpeza prévia dos efluentes, antes de estes serem introduzidos noutros aparelhos de controlo. As principais vantagens que esta tecnologia apresenta são: aparelhos de construção fácil e económica, quedas

de pressão reduzidas e captura de partículas sem recurso a meios líquidos. A maior desvantagem reside no facto destes dispositivos ocuparem muito espaço [4].

2.2.2.2 Colectores Centrífugos

Nestes equipamentos é imposta uma força centrífuga às partículas, obrigando-as a um re-direccionamento e posterior recolha.

Este mecanismo pode ser muito mais eficiente que o sistema por precipitação gravítica natural, sendo possível impor forças de arrasto muito superiores à força gravítica, permitindo recuperar partículas de dimensões mais reduzidas.

Neste grupo podemos diferenciar dois tipos de equipamentos: ciclones e precipitadores dinâmicos.

A) Ciclones

Os ciclones utilizam a força centrifuga criada pelo movimento giratório da corrente gasosa dentro do aparelho. O fluxo de gás é obrigado a seguir a geometria circular das paredes e sair pelo topo do dispositivo, enquanto que as partículas, devido à sua inércia, chocam com as paredes e são recolhidas no fundo por gravidade (Figura 3) [4].

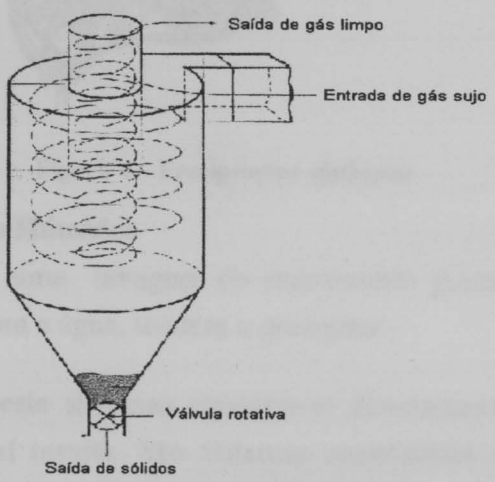


Figura 3 – Ciclone

As principais vantagens destes aparelhos são: a utilização de diversos materiais na sua construção por forma a conferirem as características necessárias para o processo onde vão ser implementados (e.g. temperaturas elevadas, partículas abrasivas) e o facto de não existirem na sua concepção partes móveis, o que implica uma manutenção simples e económica [4].

B) Precipitadores Dinâmicos

Os precipitadores dinâmicos são unidades compactas, que impõem uma força centrífuga às partículas contaminantes do meio gasoso através da acção das pás de uma turbina (Figura 4). A força centrífuga assim gerada é superior à gerada num ciclone com a mesma capacidade de tratamento, no entanto, a potência requerida é também superior. Este equipamento representa a dupla função de transporte do escoamento e de remoção de partículas do mesmo. É normalmente utilizado em partículas de reduzidas dimensões, mas não deve ser usado em meios húmidos ou fibrosos sob risco de acumulação das partículas nas pás da turbina. Outro factor condicionante é a elevada potência consumida por este mecanismo [1].

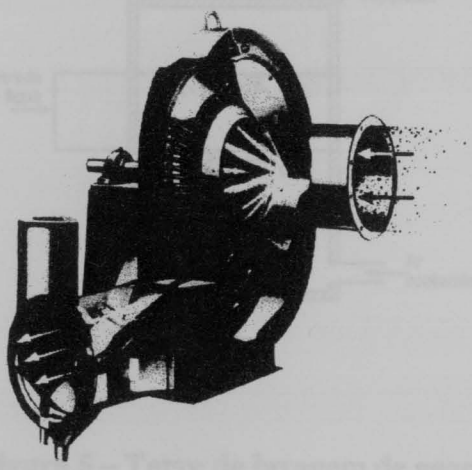


Figura 4 – Precipitador dinâmico

2.2.2.3 Colectores Húmidos

Estes sistemas executam uma lavagem do escoamento gasoso através do qual as partículas, em contacto com a água, tendem a precipitar.

A potência consumida neste sistemas encontra-se directamente relacionada com a queda de pressão que daí resulta. São sistemas económicos e eficientes, podendo tratar gases húmidos. No entanto, as elevadas e inconstantes quedas de pressão podem constituir um problema em certas unidades e os custos de manutenção podem ser elevados devido principalmente a problemas de corrosão pelo produto de reacção da água com o elemento a remover.

Para além disso, a recolha das partículas por via húmida acarreta um posterior tratamento da água resultante da recuperação de partículas.

Existem três tipos distintos de equipamentos que utilizam a técnica de recolha por via húmida no tratamento de escoamentos gasosos: os lavadores de gases, os ciclones por via húmida e os lavadores com efeito venturi [4].

A) Torres de Lavagem

A torre de lavagem da Figura 5 é constituída por um cilindro pelo fundo do qual entra o escoamento gasoso que sai pelo topo. No seu percurso as partículas colidem com as gotas de água dos chuveiros de lavagem, originando a sua precipitação no fundo da torre, para posterior recolha.

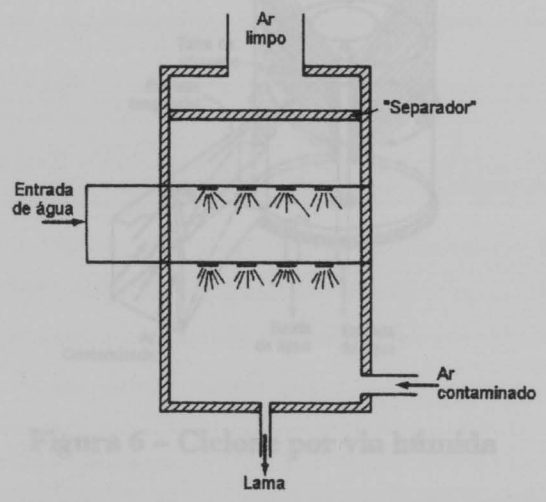


Figura 5 – Torre de lavagem de gases

As torres de lavagem são equipamentos económicos que podem ser usados na remoção de contaminantes sólidos ou gasosos. Neste sistema a queda de pressão resultante é reduzida e pode ser utilizado no tratamento de grandes volumes de ar.

São sistemas eficientes na remoção de partículas a partir de 10μm podendo mesmo efectuar uma recolha eficiente para partículas de menores dimensões (>3μm). Têm, no entanto, o problema da rejeição de um efluente líquido.

B) Ciclones por Via Húmida

Num sistema simples um ciclone por via húmida (Figura 6) apresenta vários jactos de água a alta pressão que geram uma nuvem de pequenas gotículas que contactam com as partículas contaminante, que são então arrastadas para a parede do ciclone por acção da força centrífuga actuante [4].

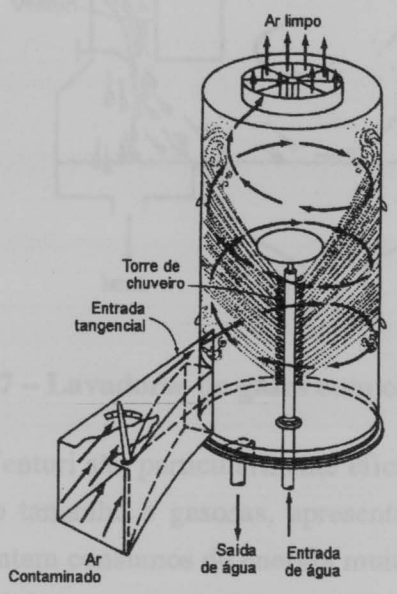


Figura 6 – Ciclone por via húmida

Apresentam uma eficiência de 100% para partículas grandes (100 μm) mas também são eficientes (90-98%) na recolha de partículas com tamanhos compreendidos entre 5 a 50 μm A eficiência deste processo é normalmente superior à atingida no sistema anterior [1].

C) Lavadores com Efeito Venturi

Os lavadores com efeito Venturi são sistemas eficazes na remoção de partículas de reduzidas dimensões (0,5 – 5μm), sendo uma solução possível para a recolha de partículas submicrométricas, tais como partículas de fumos e suspensões coloidais. O gás contaminado passa a elevada velocidade (60-180m/s) através de uma conduta em forma de venturi onde é sujeito ao contacto com um jacto de água que é atomizado pela elevada velocidade do escoamento gasoso. As pequenas gotículas de água colidem com as partículas que são posteriormente capturadas por ciclones ou colectores diversos (Figura 7) [4].

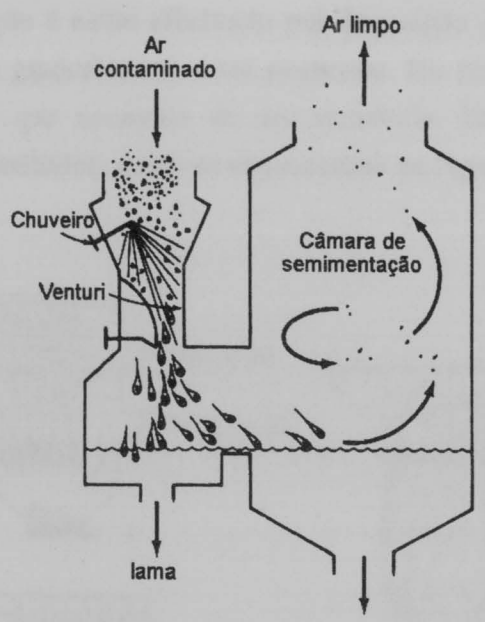


Figura 7 – Lavadores de gases com efeito Venturi

Os sistemas por efeito Venturi são particularmente eficientes na recolha de partículas sólidas de reduzidíssimo tamanho e gasosas, apresentando eficiências da ordem de 90%. No entanto, apresentam consumos de energia muito altos relativos à necessidade de elevadas velocidades do gás na entrada [4].

2.2.2.4 Filtros de Mangas

A tecnologia de filtração de partículas de efluentes gasosos é a mais implementada nos sistemas de controlo de emissões. Os filtros habitualmente usados dividem-se em vários tipos e são classificados pelo sistema de limpeza das mangas.

O mecanismo industrial para a limpeza de correntes gasosas consiste na utilização de membranas constituidas por fibras, em que o espaçamento entre estas é muitas vezes superior às dimensões das partículas a reter.

O processo de separação é então efectuado por deposição das partículas nas bermas dos poros tornando-os gradualmente mais pequenos. No final, é obtida uma camada espessa de partículas que necessita de ser removida. Esta operação é realizada recorrendo a diversos métodos, como se esquematiza na Figura 8 [4].

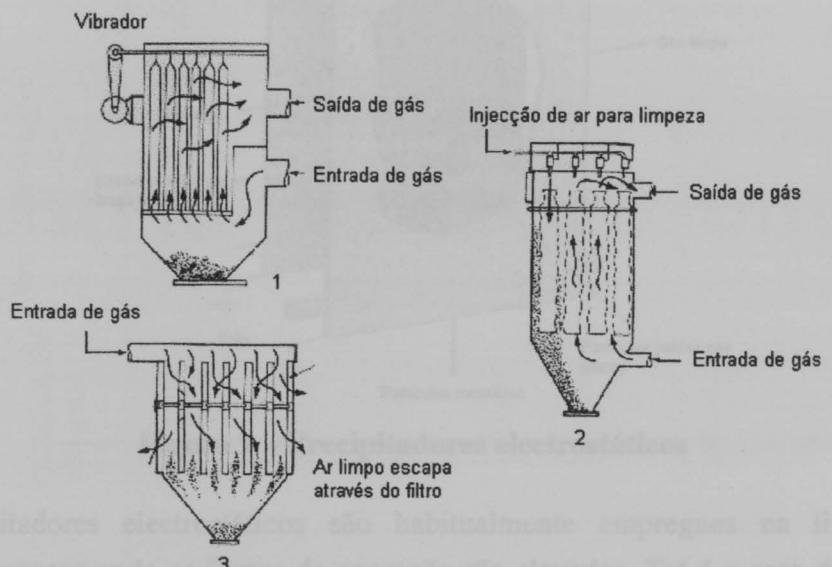


Figura 8 – Filtros de mangas

Os filtros de mangas representados na ilustração anterior são limpos das partículas, no primeiro esquema, através de um vibrador ou por batimento, no segundo por uma injecção de ar e no último, por um anel que realiza movimentos ascendentes e descendentes ao longo das mangas [5,6].

2.2.2.5 Precipitadores Electrostáticos

A tecnologia de precipitação electrostática é muito usada, tanto a nível industrial como com fins domésticos.

Num precipitador electrostático as partículas são carregadas electricamente, e sendo submetidas a um campo eléctrico, migram numa direcção perpendicular ao movimento da corrente gasosa chocando com as placas colectoras do dispositivo.

Caso as partículas captadas se encontrem no estado líquido deslizarão pelas placas colectoras e serão recolhidas no fundo do dispositivo; caso se encontrem no estado sólido é necessária a sua remoção através da raspagem das paredes.

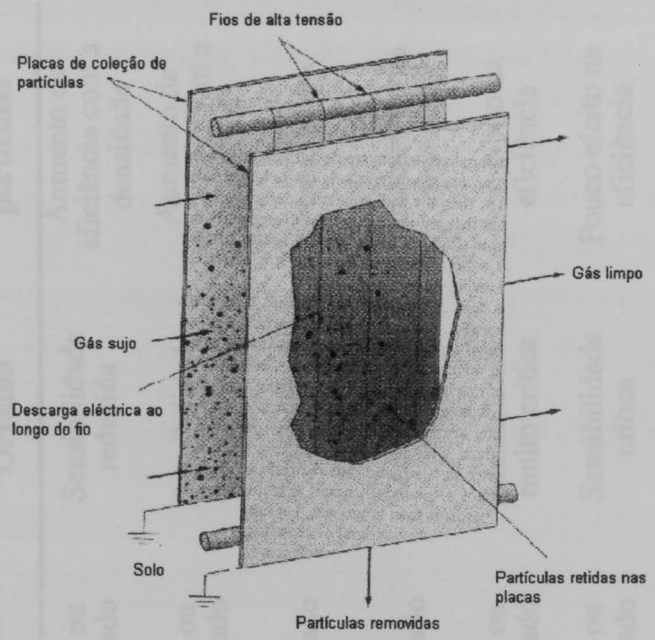


Figura 9 – Precipitadores electrostáticos

Os precipitadores electrostáticos são habitualmente empregues na limpeza de correntes gasosas onde os fluxos de operação são elevados. Tal é o caso das centrais termoeléctricas, cimenteiras e de algumas indústrias químicas e metalúrgicas.

A Tabela 2 resume as principais caraterísticas dos diversos sistemas de remoção de particulas de efluentes sólidos, tais como: tamanho das partículas captadas, quedas de pressão habitual, grau de remoção, entre outras [4].

Tabela 2 – Características gerais dos sistemas de separação de partículas

Colector	Tamanho das partículas (μm)	Queda de pressão (in wc.)	Grau de remoção	Temperatura máxima (°C)	Condições do efluente	Sensibilidade ao ponto de Orvalho	Efeito da densidade das partículas
Câmaras de sedimentação	**> 150**	**< 1**	50% -< 50μm 95% -> 300 μm	500	Seco ou molhado	Sensibilidade reduzida	Aumento da eficiência com a densidade
Ciclones	**> 10**	**1-3**	80% -< 20μm 95% -> 50μm	500	Seco ou molhado	Sensibilidade critica	Aumento da eficiência com a densidade
Torres de chuveiro	**>3**	**2 – 7**	98% -> 5μm 50% -< 3μm	200-250	Molhado	Sensibilidade nula	Pouco efeito
Lavadores com efeito Venturi	**>0,3 – 1,0**	**15 – 30**	90-99% -< 5μm	200-250	Molhado	Sensibilidade nula	Pouco efeito na eficiência
Filtros de manga	**> 0,5 – 1,0**	**1 – 10**	95-99% -< 5μm	200-250	Seco ou molhado	Sensibilidade muito critica	Sem efeito na eficiência
Precipitador electrostático	**> 0,001**	**0,25 – 0,5**	80% a 99% para todas as partículas	500	Seco ou molhado	Sensibilidade critica	Pouco efeito na eficiência
Filtros de papel de alta eficiência	**> 0,3 - 0,5**	**0,5 – 2,0**	> 99,9% - < 5μm	50	Seco	Sensibilidade muito critica	Sem efeito na eficiência

2.2.3 Sistemas de Recuperação de Poeiras Finas

Como facilmente se pode constatar, a recolha de partículas finas é sensivelmente mais difícil e complexa que a remoção de partículas grosseiras. Praticamente todas as técnicas apresentadas, com a excepção dos sedimentadores gravíticos, podem constituir uma solução eficiente de remoção de partículas finas (Tabela 3). Actualmente, os equipamentos de controlo de partículas finas para tratamento de correntes gasosas contaminadas são agrupados em quatro categorias:

- precipitadores electrostáticos;
- filtros de mangas;
- colectores por via húmida;
- colectores dinâmicos.

A Tabela 3 apresenta as vantagens e inconvenientes das unidades processuais para separação de partículas do gás, bem como o seu campo típico de aplicação [1].

Tabela 3 – Comparação dos sistemas de recuperação de partículas finas

Características	Precipitador electrostático	Filtro	Colector ciclónico	Lavador de gases
Eficiência da recuperação	elevada	elevada	baixa	elevada
Capacidade para uma carga de sólidos elevada	não	não	Sim	não
Queda de pressão	muito baixa	média-baixa	média-baixa	média-alta
Custo Capital	muito elevado	elevado	baixo	elevado
Custo de Operação	elevado	elevado	baixo	médio-elevado
Capacidade de operação a alta pressão e temperatura	sim	não	sim	não
Espaço necessário	elevado	elevado	baixo	médio
Dificuldade com certas substâncias	alguma	alguma	nenhuma	nenhuma
Perigo de explosão, de incêndio ou tensão	sim	sim	não	não
Requisitos especiais de manutenção	sim	sim	não	não
Produção de ozono	sim	não	não	não
Necessidade de tratamento de águas residuais	não	não	não	sim

Nos colectores dinâmicos, os ciclones possuem um relevo especial devido principalmente às consideráveis vantagens que apresentam:

- baixo custo;
- reduzida manutenção;
- fácil limpeza;
- equipamento simples;

- sem partes móveis;
- boa eficiência;
- unidades compactas.

Apesar deste vasto conjunto de vantagens, os ciclones apenas apresentam uma elevada eficiência na recolha de partículas de médias a grandes dimensões. A sua eficiência é francamente reduzida na recolha de partículas finas e suspensões coloidais. No entanto, têm sido conseguidos avanços na optimização destes simples equipamentos no sentido de alargar a sua gama eficiente até às partículas finas. Outra forma de melhorar o seu desempenho é conseguida pela recirculação parcial do escoamento num mesmo ciclone.

2.2.3.1 Separador Rotativo de Partículas

O separador rotativo de partículas utiliza uma técnica com patente holandesa, aplicada como uma solução eficaz e simples no tratamento de ar permitindo a recolha de partículas de reduzidas dimensões, e suspensões coloidais [1].

Este sistema apresenta-se como uma combinação híbrida de um ciclone de fluxo invertido com um filtro rotativo que actua por sedimentação dinâmica, representado na Figura 10. Constitui uma alternativa atractiva relativamente aos métodos existentes: filtros de mangas, separadores electrostáticos e lavadores de gases [1].

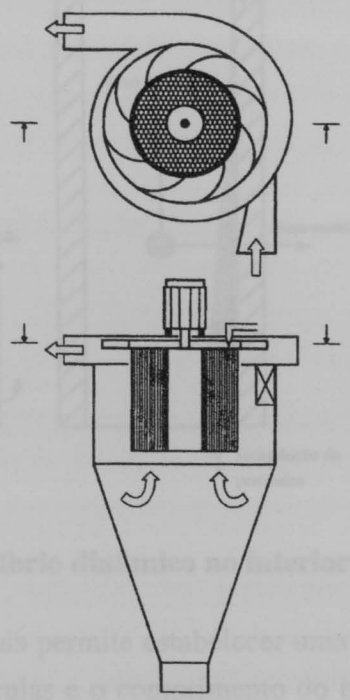


Figura 10 – Separador rotativo de partículas

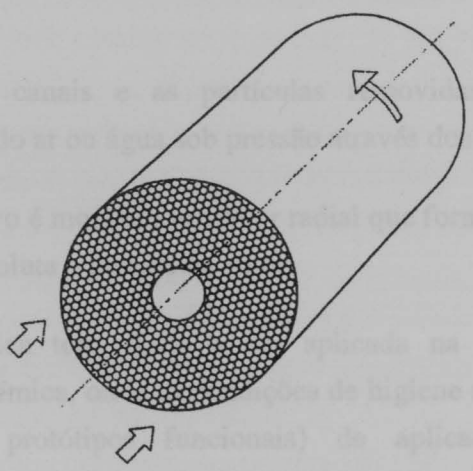


Figura 11 – Filtro rotativo

O ar sofre um processo primário de precipitação dinâmica pela acção da força centrífuga gerada sobre o escoamento dentro do ciclone permitindo a precipitação das partículas de dimensões inferiores a 5 μm.

Na saída do ciclone o ar é obrigado a passar por um conjunto de filtros tubulares (Figura 10) cujo movimento rotativo impõe uma força centrífuga sobre as partículas mais finas, sobreviventes do processo de recolha primária, centrifugando-as contra a superfície do filtro (Figura 12).

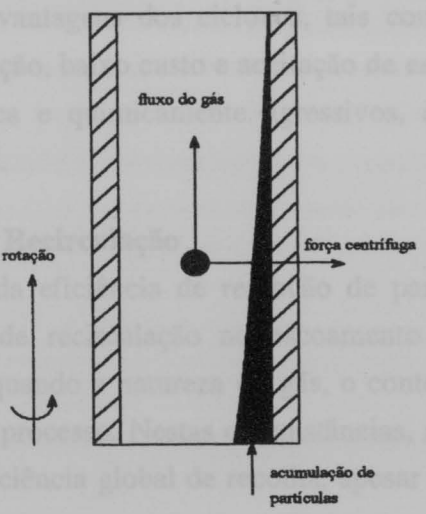


Figura 12 – Equilíbrio dinâmico no interior do filtro tubular

O diâmetro reduzido dos canais permite estabelecer uma relação baixa entre distância radial a percorrer pelas partículas e o comprimento do tubo, conseguindo-se, mesmo para uma velocidade tangencial do filtro baixa relativamente à elevada velocidade axial do escoamento através dos canais, garantir a recolha de partículas de dimensões reduzidas [1].

O gás limpo sai dos canais e as partículas removidas podem ser retiradas periodicamente, injectando ar ou água sob pressão através dos canais.

A jusante do filtro rotativo é montado um rotor radial que fornece a pressão necessária ao gás saindo este pela voluta a jusante do rotor.

Desde 1994, esta técnica tem vindo a ser aplicada na indústria farmacêutica, alimentar, cerâmica e química, onde as condições de higiene são essenciais, existindo mesmo tentativas (e protótipos funcionais) de aplicação deste mecanismo extremamente compacto em sistemas domésticos de purificação do ar [1].

A versão húmida do separador oferece a capacidade de limpeza contínua através de jactos de água. Esta possibilidade torna-se muito útil na remoção de partículas húmidas ou aderentes, aerossóis de detergentes, sal e outros.

A versão húmida do separador rotativo de partículas é uma alternativa economicamente mais favorável que os lavadores de gases devido principalmente ao reduzido consumo de líquido no processo de lavagem, apresentando por isso um consumo significativamente menor, mantendo contudo a sua eficiência.

Estes filtros associam as vantagens dos ciclones, tais como construção simples e compacta, a baixa manutenção, baixo custo e aceitação de escoamentos a temperatura elevada e com gases física e quimicamente agressivos, à capacidade de recolha eficiente de partículas finas.

2.2.3.2 Ciclones de Recirculação

Um método de aumento da eficiência de remoção de partículas dos ciclones é a inclusão de um circuito de recirculação no escoamento gasoso. Este método é particularmente aplicável quando a natureza do gás, o conteúdo de poeira e o tipo e tamanho das partículas no processo. Nestas circunstâncias, a utilização deste método torna possível manter a eficiência global de recolha, apesar das condições de entrada não estacionárias [1].

Os ciclones existentes no mercado são construídos segundo certos padrões dimensionais Isto significa, que raramente se ajustam exactamente às condições operacionais, mesmo para condições relativamente estáveis.

A recirculação oferece a possibilidade de ajustar a velocidade de entrada à geometria do ciclone, permitindo que esta permaneça num patamar óptimo. O princípio de funcionamento de um ciclone consiste na imposição de um movimento de rotação ao gás contaminado, forçando a deposição das partículas nas paredes e, consequentemente, no fundo do equipamento. Assim, um aumento na velocidade de entrada do gás aumenta a recolha das partículas (especialmente aquelas com diâmetros menores), aumentando assim a eficiência global de remoção das partículas. Infelizmente a velocidade de entrada não pode ser aumentada indefinidamente, devido à possibilidade de as partículas poderem ser arrastadas com o gás de saída do ciclone, diminuindo drasticamente a eficiência do processo (fenómeno de ressuspensão). Desta forma, existe um valor óptimo de velocidade de entrada no qual a eficiência de remoção de partículas atinge o seu máximo (Figura 13) [1].

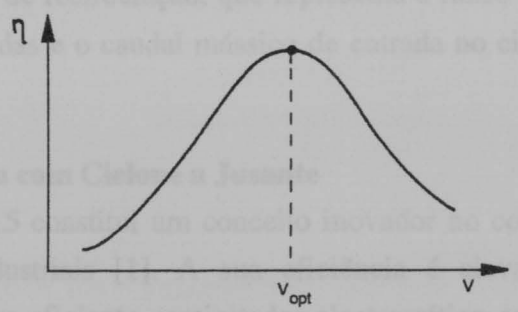


Figura 13 – Eficiência de recolha de partículas *versus* velocidade de entrada no ciclone

Em processos industriais a remoção de partículas pode ser não estacionária devido à variação de parâmetros do gás ou poeiras ou porque a geometria do equipamento pode não se ajustar de uma forma exacta às condições actuais de operação. Consequentemente, nem sempre é possível manter a velocidade de entrada num valor óptimo. Estes problemas podem ser remediados, pelo menos com alguma extensão, usando uma recirculação parcial do gás [1].

Assumindo o ciclone apresentado na Figura 14, a sua eficiência para um processo de remoção de partículas, é dada pela expressão:

$$\eta_c = 1 - \left(\frac{I}{N}\right) = \frac{C}{N} \qquad (1)$$

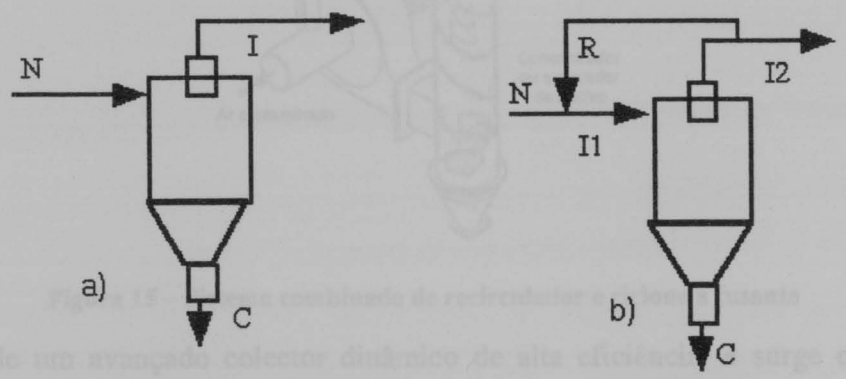


Figura 14 – a) Ciclone simples e b) Ciclone com recirculação

Introduzindo uma recirculação no escoamento, a eficiência do sistema é dada pela equação:

$$\eta = \frac{\eta_c}{1 - f(1 - \eta_c)} \qquad (2)$$

Sendo, f – coeficiente de recirculação, que representa a razão entre o caudal mássico de partículas recirculadas e o caudal mássico de entrada no ciclone e η – eficiência mássica do ciclone.

2.2.3.3 Sistema com Ciclone a Jusante

O sistema da Figura 15 constitui um conceito inovador no controlo de partículas de efluentes gasosos industriais [1]. A sua eficiência é elevada, atingindo valores comparáveis aos de um eficiente precipitador electrostático ou filtro, sem os custos, inicial e de manutenção, associados. Em determinadas aplicações pode ser

comparáveis aos de um eficiente precipitador electrostático ou filtro, sem os custos, inicial e de manutenção, associados. Em determinadas aplicações pode ser considerada uma das soluções mais adequadas, pelo menos ajuizando as vantagens segundo os seus proponentes [7].

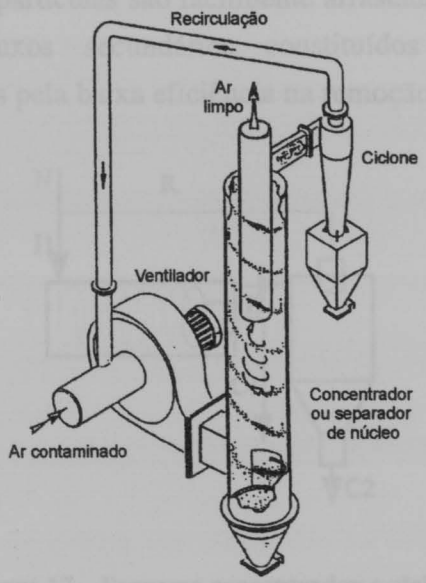


Figura 15 – Sistema combinado de recirculador e ciclone a jusante

Trata-se de um avançado colector dinâmico de alta eficiência, e surge como uma melhoria significativa dos colectores mecânicos de baixo custo, ineficazes na remoção de poeiras finas, isto é, aquelas com diâmetros aerodinâmicos abaixo de 10 μm [1].

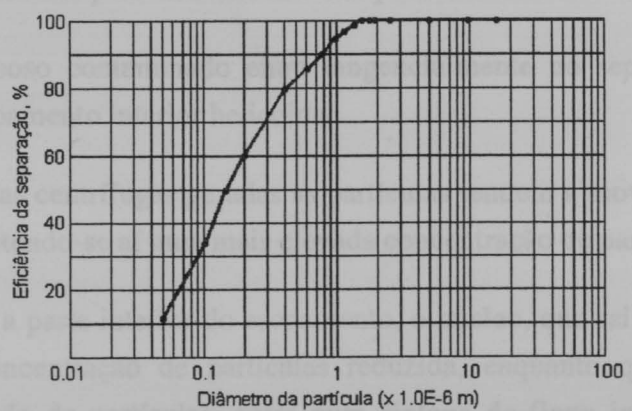


Figura 16 – Eficiência do concentrador em função do diâmetro das partículas

Mantendo a maior parte das vantagens dos ciclones, é capaz de remover uma proporção considerável de partículas de tamanho inferior a 1 μm e praticamente todas

as partículas com diâmetros superiores a 2-3 μm, como podemos verificar pela Figura 16 [1].

Nos ciclones tradicionais, devido aos efeitos difusionais do fluxo ciclónico, mesmo as partículas mais pequenas têm uma probabilidade significativa de atingirem a camada da parede. Contudo estas partículas são facilmente arrastadas para o interior do fluxo limpo, pelos fortes fluxos secundários constituídos por vórtices toroidais estacionários, responsáveis pela baixa eficiência na remoção de partículas finas [1].

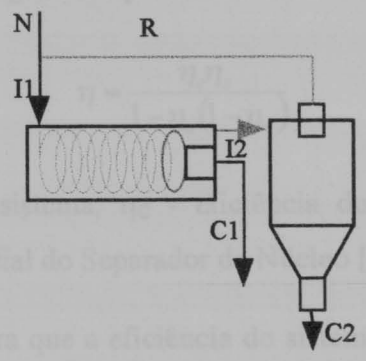


Figura 17 – Esquema concentrador + ciclone

A configuração deste sistema, apresentada na Figura 17, consiste em dois componentes principais. O componente principal é um separador centrífugo, denominado por separador de núcleo, no qual o núcleo do escoamento interior está adjacente à corrente limpa de saída; esta região é livre de vórtices ou fluxos secundários responsáveis pelo arrastamento das partículas finas.

O escoamento gasoso contaminado entra tangencialmente no separador de núcleo criando-se um escoamento interior helicoidal.

Por efeito das forças centrífugas geradas as partículas tendem a mover-se radialmente para a periferia, obtendo-se aí uma mais elevada concentração de partículas.

Ao atingir o topo, a parte interior do escoamento, o núcleo, que sai pela saída central apresenta uma concentração de partículas reduzida, enquanto que o escoamento periférico, carregado de partículas, entra num ciclone de fluxo invertido no qual é realizada a remoção das partículas. Daí, o gás resultante constitui o fluxo de recirculação que entra de novo no separador de núcleo.

Segundo uma visão global, o processo de remoção realiza-se, neste caso, segundo duas fases distintas que ocorrem em equipamentos também distintos: a separação e concentração de partículas, realizada no separador de núcleo e a remoção, efectuada

no ciclone. Se o separador apresentar uma eficiência elevada, as partículas mais finas serão continuamente recirculadas dentro do sistema até que o ciclone as consiga reter [1]. Este é o calcanhar de Aquiles deste sistema...

A interacção entre os componentes individuais é a principal razão de se conseguir uma eficiência de recuperação de partículas superior. Assim, é possível demonstrar que uma elevada eficiência do separador de núcleo pré-determina a eficiência de todo o sistema, mesmo que a eficiência do colector seja baixa. A eficiência deste sistema pode ser obtida segundo a seguinte expressão analítica:

$$\eta = \frac{\eta_c \eta_s}{1 - \eta_s (1 - \eta_c)} \qquad (3)$$

Sendo: η - eficiência do sistema, η_C - eficiência do colector de ciclone e η_S - eficiência da separação parcial do Separador de Núcleo [1].

A análise da equação mostra que a eficiência do sistema permanece elevada, mesmo para uma baixa eficiência do ciclone de recolha das partículas, desde que a eficiência do separador seja elevada. No entanto, também é fácil ver que a eficiência deste sistema pode ser inferior à de um ciclone isolado, bastando para isso que o concentrador tenha uma eficiência menor que o colector.

O separador de núcleo tem uma combinação atractiva de características vantajosas, tais como [1]:

- **Elevada eficiência de recuperação** - O separador de núcleo pode recolher eficientemente poeiras grossas e finas.
- **Capacidade de operar a altas temperaturas** - o sistema pode operar a temperaturas de elevadas (260 a 540 ºC), o que está para além das capacidades dos filtros e de outros equipamentos eficientes na recolha de partículas finas. Para temperaturas acima dos 540 ºC, o equipamento pode ser modificado por inclusão de um sistema de arrefecimento.
- **Flexibilidade** - o equipamento é insensível à concentração de partículas. Pode ser orientado tanto verticalmente ou horizontalmente, com escoamentos ascendentes ou descendentes.
- **Reduzido consumo energético** - a perda de pressão e o consumo de energia resultante é comparável (ligeiramente superior) aos ciclones convencionais.
- **Baixo custo**
- **Simplicidade do sistema**

- **Reduzida manutenção**

A Figura 18 posiciona esta técnica entre as técnicas convencionais de remoção de partículas finas.

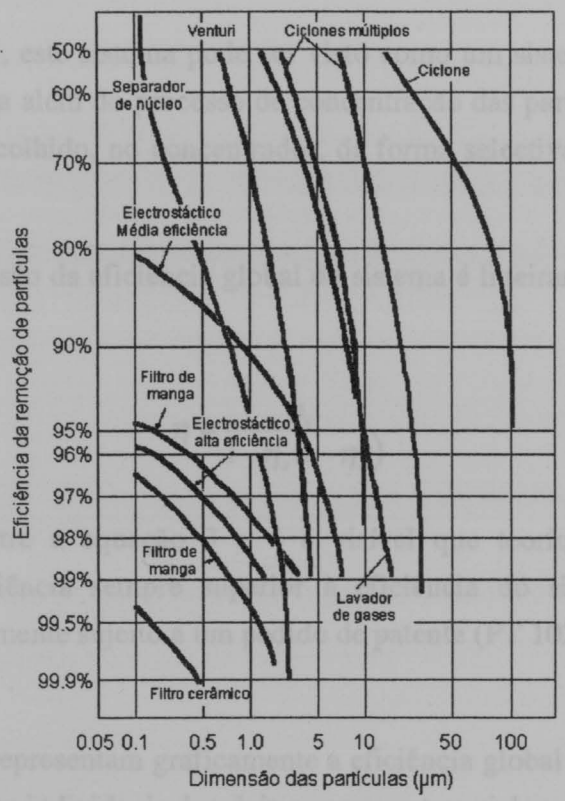


Figura 18 – Eficiência de remoção de partículas finas nas técnicas convencionais

2.2.3.4 Sistema com Ciclone a Montante

Como se pode observar da Figura 19, este sistema é constituido pelos mesmos componentes que o anteriormente apresentado mas a sua configuração é diferente, resultando este facto num mecanismo de recolha distinto.

No anterior, as funções de separação e recolha eram realizadas de forma individual pelo separador e pelo ciclone, respectivamente. Neste sistema, embora apenas o ciclone execute a remoção das partículas, a separação é realizada por ambos os equipamentos, ou seja, é realizada uma separação inicial das partículas mais grossas no ciclone, e o escoamento resultante é transferido

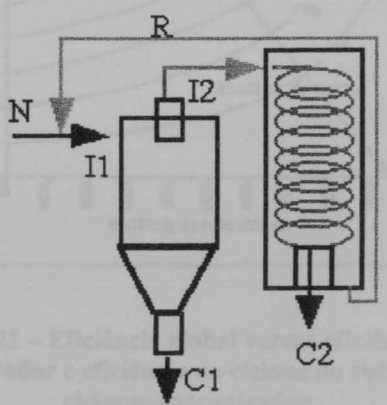


Figura 19 – Concentrador + ciclone a montante

para um concentrador que por centrifugação irá concentrar as partículas remanescentes, cujo resultado irá constituir um caudal de recirculação a introduzir na entrada do ciclone. Pela saída central do concentrador sai o gás limpo a emitir para a atmosfera [1].

De uma forma geral, este sistema pode ser visto como um sistema com recirculação simples no qual, para além do processo de concentração das partículas, o escoamento de recirculação é recolhido, no concentrador, de forma selectiva, absorvendo a parte contaminada.

Neste caso, a expressão da eficiência global do sistema é ligeiramente diferente da do sistema anterior:

$$\eta = \frac{\eta_c}{1-\eta_s(1-\eta_c)} \tag{4}$$

Por comparação entre a equação 3 e 4 é visível que teoricamente este sistema apresenta uma eficiência sempre superior à eficiência do sistema anterior. Este processo foi recentemente sujeito a um pedido de patente (PT 1021666, PE 99670006) [8, 9].

As Figuras 20 e 21 representam graficamente a eficiência global dos dois sistemas em função das eficiências individuais dos dois componentes: ciclone e concentrador.

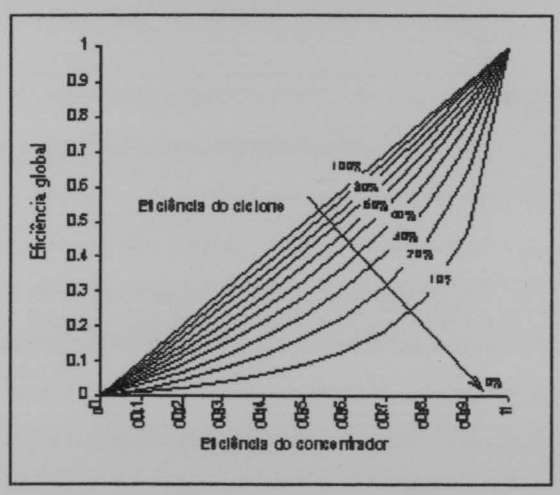


Figura 20 – Eficiência global versus eficiência do separador e eficiência do ciclone no sistema concentrador+ciclone

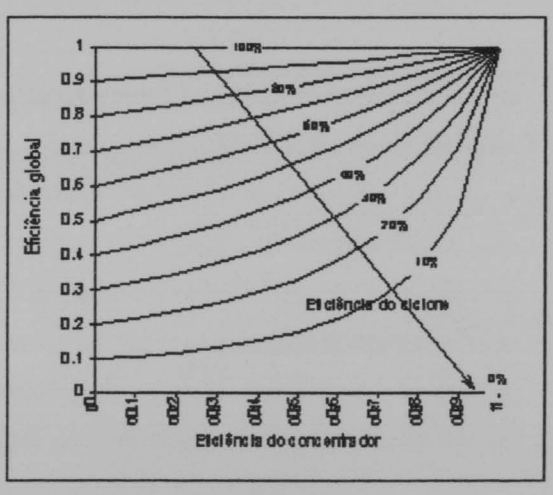


Figura 21 – Eficiência global versus eficiência do separador e eficiência do ciclone no sistema ciclone+concentrador

2.3 Referências Bibliográficas

1 – M. Cândido, *Recuperação de poeiras finas com ciclones de recirculação – Teses de Mestrado em Engenharia do Ambiente*, FEUP, **1998**.

2 – D.L. nº 352/90 de 9 de Novembro.

3 – Portaria 286/93, de 12 de Março.

4 – A. Cabral, A. Pereira, S. Araújo, *Co-incineração*, Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, **1999**.

5 – J.H. Seinfeld, R.C. Flagan, *Fundamentals of Air Pollution Engineering*, California Institute of Technology, Prentice Hall, New Jersey, **1998**.

6 – N. Nevers, *Air Pollution Control Engineering*, University of Utah, McGraw-Hill Inc., **1995**.

7 – S. Wysk, L. Smolensky, A. Murison, *Novel Particulate Control Device for Industrial Gas Cleaning*, Filtration & Separation, **1993**.

8 – PT 102166, Instituto Nacional de Propriedade Industrial, **1998**.

9 – PE 99670006, Instituto Nacional de Propriedade Industrial, **1999**.

3 DESCRIÇÃO DO PROJECTO

3.1 Descrição Sumária do Problema Objecto de Projecto

Os ciclones são despoeiradores utilizados em vários tipos de indústrias, com dois fins complementares:

- remoção de poeiras dos gases emitidos por processos, antes de serem libertados para a atmosfera;
- recuperação de poeiras úteis como matéria prima dos processos que as geraram (e.g. industria metalomecânica, cimenteira).

O desenvolvimento de ciclones com eficiências significativamente superiores às dos ciclones actualmente existentes, sobretudo para partículas abaixo de 5μm tem um elevado potencial para aplicação industrial. Várias indústrias (e.g. madeira, metalomecânica, cimenteira, produção química em granulados e em pó) poderiam usufruir de equipamentos de baixo custo e com eficiência suficiente para colmatar a necessidade de recorrer a equipamentos muito mais caros, como filtro de mangas e electrofiltros. A existência de ciclones de muito elevada eficiência a montante seria amplamente justificada pela protecção (diminuição da abrasão, erosão e desgaste) que estes trariam aos equipamentos mais dispendiosos. Em casos de processos a elevadas temperaturas (ex. caldeiras sem recuperadores) e pressões, os ciclones são actualmente, além dos excessivamente caros filtros cerâmicos, os únicos despoeiradores que se podem aplicar.

O presente projecto refere-se a uma geometria de ciclones de fluxo invertido, que foi optimizada por computador, e que deu origem a uma patente [1, 2]. Trata-se de uma geometria completamente distinta das existentes no mercado, tendo sido testada a nível laboratorial com partículas muito finas (1-2μm), e demostrado ser significativamente mais eficiente do que outras geometrias de elevada eficiência disponíveis. O desenvolvimento e implementação de uma instalação à escala piloto tem como objectivo a verificação da performance do ciclone referido (sem e com recirculação parcial) para captura à escala industrial de poeiras muito finas. O sistema de recirculação parcial também foi objecto de uma patente (PT 102392) [3].

O Dr R. Salcedo, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, detentor intelectual das patentes referidas desenvolveu e implementou uma instalação à escala piloto que servirá para verificação da performance dos ciclones de elevada eficiência

(RS_VHE), sem e com recirculação parcial, para captura à escala industrial de poeiras muito finas.

A Azevedos Indústria que há mais de 30 anos se dedica ao projecto, fabrico e instalação de máquinas e equipamentos, efectuou e documentou o projecto da instalação piloto, construiu os equipamentos da instalação e a montagem do referido equipamento na unidade de produção de ácido sulfanílico da QUIMIGAL-Química de Portugal, SA., Estarreja.

3.2 Justificação do Projecto

3.2.1 Caracterização do Estado da Arte

Os ciclones industriais são de vários tipos, sendo os mais utilizados, os de fluxo invertido, cujo esquema se mostra na

Figura 22.

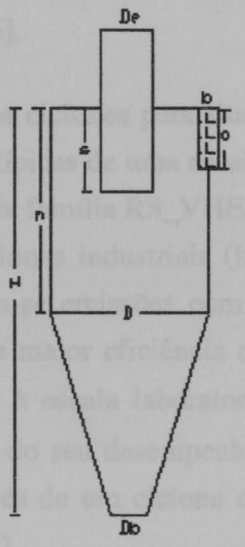


Figura 22 – Diagrama de um ciclone de fluxo invertido

O gás entra pela secção *ab* e é obrigado a descrever uma espiral descendente, até que muda de direcção devido ao campo de pressões, saindo no topo pelo tubo de vórtice de comprimento s e de diâmetro D_e. No seu trajecto descendente, as partículas são arrastadas para as paredes e acabam por ser transportadas para o fundo do ciclone. Os fabricantes de ciclones especificam os seus projectos através de "familias", caracterizadas por apresentarem relações fixas de 7 dimensões-chave (os rácios de a, b, s, D_e, h, H e D_b relativamente a D) [4].

O problema da obtenção de geometrias mais eficientes tem sido abordado através da via empírica (pelo processo de tentativa e erro), como o demostram os poucos trabalhos existentes sobre o assunto [4]. As melhorias não são geralmente muito significativas, requerendo demasiado tempo e custo de desenvolvimento. Embora haja muitas teorias para descrever o comportamento de ciclones, apenas recentemente é possível projectar ciclones de geometria arbitrária e prever qual o seu comportamento [4]. Não há portanto qualquer garantia que existam no mercado os melhores ciclones de fluxo invertido, isto é, os mais eficientes e que tenham em simultâneo baixos consumos energéticos. Formulando um problema de optimização numérica, conseguiu-se obter uma geometria, designada por RS_VHE, que foi objecto de uma patente (PT102166, PE99670006). Os ciclones RS_VHE têm todos os rácios diferentes de todas as outras geometrias analisadas, e revelaram-se, à escala laboratorial, significativamente mais eficientes do que outras geometrias de elevada eficiência. Por exemplo, numa experiência de captura de poeiras de 1-2μm, as emissões do ciclone RS_VHE foram 27% inferiores às de outro ciclone de elevada eficiência existente no mercado [5].

A previsão do comportamento dos ciclones para situações industriais foi simulada, e em todas as situações previstas e típicas de uma escala industrial, é notório o aumento de eficiência que se espera obter da família RS_VHE. Por exemplo, para caudais entre 100-200m^3/h, típicos de multiciclones industriais (baterias de ciclones de pequenas dimensões em paralelo), prevêem-se emissões com a geometria RS_VHE cerca de 30% inferiores às dos ciclones de maior eficiência disponíveis na literatura, ou seja, valores comparáveis aos obtidos à escala laboratorial [4]. É também teoricamente possível conseguir uma melhoria do seu desempenho, obrigando a uma recirculação parcial das poeiras e gases, através de um ciclone concentrador com acoplamento a um ventilador auxiliar (PT102392).

Há algumas empresas em Portugal envolvidas no negócio de dimensionamento, projecto e montagem de equipamentos de despoeiramento, por exemplo: Aeráulica-Instalações Industriasis, Lda; Efacec ambiente; Neu Portugal; Ventil, etc. Até ao momento a maioria opera com *know-how* importado.

Como o equipamento proposto apresenta custos de investimento e operatórios significativamente inferiores aos dos despoeiradores mais eficientes, e como é possível que nalguns casos possa ser utilizado em sua alternativa, sendo ainda uma das únicas soluções aplicáveis a alta temperatura e pressão, o seu campo de aplicação é elevado. Para pequenas industrias, que não têm hipóteses de instalação de

despoeiradores eficazes e caros, pode ser a única solução viável de continuarem em laboração e simultaneamente cumprirem a legislação ambiental.

3.2.2 Objectivos Tecnológicos do Projecto

O projecto RS_VHE visou o desenvolvimento e implementação à escala piloto que, testada numa unidade de produção de ácido sulfanílico, tem por objectivo servir para verificação do desempenho dos ciclones RS_VHE (sem e com recirculação parcial) para captura à escala industrial de poeiras muito finas.

As etapas de desenvolvimento do projecto foram as seguintes, por ordem cronológica:

1. Dimensionamento, projecto e montagem de uma rede de despoeiramento que incluiu:

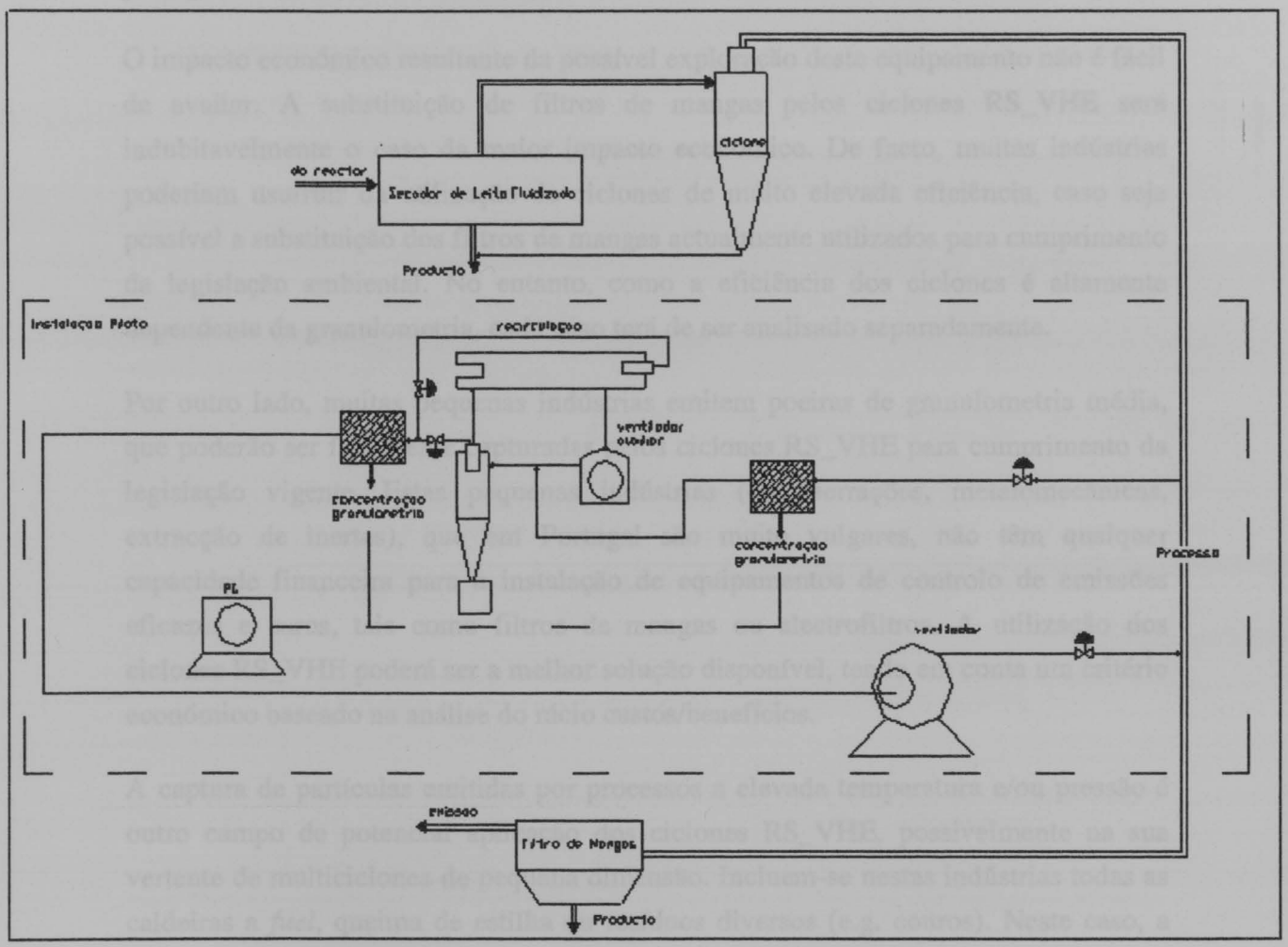
    a. Um ramal de transporte de sólidos, para um caudal nominal de ar de 1000Nm^3/h. Neste ramal foi incluído o ciclone de teste, sem e com recirculção parcial e dois ventiladores adequados com variadores de velocidade.

    b. Um ciclone RS_VHE projectado para um caudal nominal de 1000Nm^3/h e uma perda de carga máxima de 1,3-1,5kPa. Pretendeu-se variar o caudal por variação da frequência no ventilador principal, de modo a determinar qual de facto o melhor caudal a tratar com este ciclone, de modo a afinar o seu dimensionamento, incluindo o efeito de velocidades excessivas na ressuspensão de partículas (determinação da velocidade óptima de entrada).

    c. O ramal incluiu três pontos de amostragem, à entrada e à saída do sistema e à saída do recirculador para determinação das eficiências globais e granulometrias.

2. Estabelecimento das eficiências globais e fraccionais (com e sem recirculação parcial). As eficiências globais e fraccionais e as granulometrias foram obtidas por amostragem isocinética uma vez que este método é o único compatível com as variações de caudal necessárias ao estabelecimento do correcto dimensionamento dos ciclones RS_VHE. Estas medições foram acompanhadas por medições da perda de carga nos ciclones, para obter uma estimativa dos custos operatórios e verificação experimental das perdas de carga de projecto.

De seguida apresenta-se um esboço da instalação piloto instalada na QUIMIGAL:



3.3 Viabilidade

3.3.1 Resultados Económicos e de Mercado Esperados

O desenvolvimento sustentável implica que se coloque um ênfase crescente no valor do ambiente natural, construído e mesmo cultural. A qualidade ambiental é vista como uma condição cada vez mais importante na realização de objectivos de desenvolvimento não só numa perspectiva de aumento do rendimento individual como numa visão mais ampla, da qualidade de vida. Esta situação determina que, no caso das decisões de carácter ambiental, os valores em causa tenham de ser considerados no mesmo plano de valores de qualquer outra decisão: eficácia, viabilidade e rentabilidade.

Assim o equipamento objecto deste projecto tem como objectivo satisfazer as solicitações do mercado, pois espera-se que apresente resultados de elevada eficácia

ambiental, assim como uma relação custo benefício ajustável ao tecido empresarial português.

O impacto económico resultante da possível exploração deste equipamento não é fácil de avaliar. A substituição de filtros de mangas pelos ciclones RS_VHE será indubitavelmente o caso da maior impacto económico. De facto, muitas indústrias poderiam usufruir da utilização de ciclones de muito elevada eficiência, caso seja possível a substituição dos filtros de mangas actualmente utilizados para cumprimento da legislação ambiental. No entanto, como a eficiência dos ciclones é altamente dependente da granulometria, cada caso terá de ser analisado separadamente.

Por outro lado, muitas pequenas indústrias emitem poeiras de granulometria média, que poderão ser facilmente capturadas pelos ciclones RS_VHE para cumprimento da legislação vigente. Estas pequenas indústrias (e.g. serrações, metalomecânicas, extracção de inertes), que em Portugal são muito vulgares, não têm qualquer capacidade financeira para a instalação de equipamentos de controlo de emissões eficazes e caros, tais como filtros de mangas ou electrofiltros. A utilização dos ciclones RS_VHE poderá ser a melhor solução disponível, tendo em conta um critério económico baseado na análise do rácio custos/benefícios.

A captura de partículas emitidas por processos a elevada temperatura e/ou pressão é outro campo de potencial aplicação dos ciclones RS_VHE, possivelmente na sua vertente de multiciclones de pequena dimensão. Incluem-se nestas indústrias todas as caldeiras a *fuel*, queima de estilha ou resíduos diversos (e.g. couros). Neste caso, a utilização de ciclones como despoeiradores primários parece ser o único meio disponível, e haverá uma nítida vantagem uma vez que a sua eficiência se venha a comprovar superior à de modelos actualmente disponíveis no mercado, nomeadamente na sua opção de recirculação parcial através de um ciclone concentrador.

O risco associado ao projecto resume-se à possível, mas improvável, falta de correspondência entre os resultados obtidos em laboratório e os obtidos à escala piloto. A unidade de produção de ácido sulfanílico servirá como plataforma de desenvolvimento apropriada à demonstração à escala piloto dos ciclones RS_VHE, e permitirá comparar estes com o desempenho do sistema de recirculação parcial.

3.4 Gestão do Projecto

3.4.1 Objectivos Parciais a Atingir

A Tabela 4 resume o conjunto de tarefas parciais que foram propostas, bem como os resultados esperados após a sua execução [6].

Tabela 4 – Tarefas e resultados parciais do projecto

Tarefas		Resultados/Objectivos
Código	**Descrição**	**Descrição**
T1	Dimensionamento da instalação piloto	Dimensão
T2	Projecto da instalação piloto	Projecto
T3	Construção dos equipamentos para a instalação piloto	Arquitectura final
T4	Montagem dos elementos na instalação piloto	Instalação piloto
T5	Amostragem e medição das eficiências dos ciclones; estudo comparativo	Registo das eficiências e conclusões
T6	Conclusão final da introdução dos ciclones RS_VHE	Conclusões das leituras das eficiências
T7	Gestão do projecto	Relatórios

A tarefa T1, *dimensionamento da instalação piloto*, teve como resultado o dimensionamento dos diversos equipamentos que compõem a instalação. O dimensionamento dos ciclones RS_VHE foi efectuado pelo Director do Projecto, na FEUP, através de programas de computador disponíveis e elaborados pelo próprio. O dimensionamento do recirculador foi efectuado a partir de uma instalação à escala laboratorial. O dimensionamento das restantes peças (tubagem, contracções e expansões, válvulas, flanges) foi efectuado tendo em conta o espaço disponível na unidade de produção de ácido sulfanílico da QUIMIGAL, e o dimensionamento do ciclone e recirculador.

A tarefa T2, *projecto da instalação piloto*, foi efectuada pela Azevedos, S.A. mediante apoio logístico da Aeraulica, Lda, com base no dimensionamento resultante da tarefa T1. Foi dado especial relevo à necessidade de manter a instalação piloto não intrusiva na instalação fabril, interferindo com esta o mínimo possível. Assim, a instalação fabril apenas forneceu a poeira de processo (e condições operatórias de

humidade e temperatura) que serviram de teste à instalação piloto, ficando o controlo dos caudais dos ciclones RS_VHE a cargo dos ventiladores e válvulas da instalação piloto.

A tarefa T3, *construção dos equipamentos para a instalação piloto*, ficou a cargo da Azevedos Indústria, SA, tendo sido o processo supervisionado pelo Director de Projecto. A unidade piloto, tubagem e acessórios foi quase integralmente montada na Azevedos Indústria, SA, tendo sido transportada por camião para a QUIMIGAL [6].

As Figuras 23 e 24 mostram duas vistas da unidade piloto, quando estava a ser terminada na Azevedos Industria, SA.

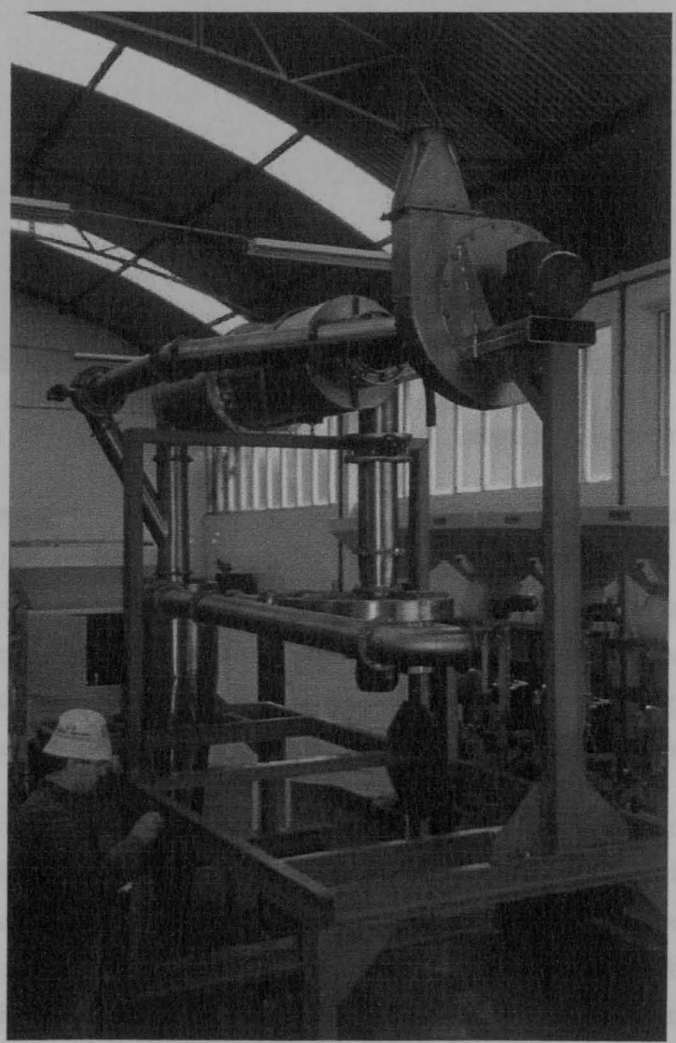


Figura 23 – Acabamento da unidade piloto na Azevedos Indústria, SA

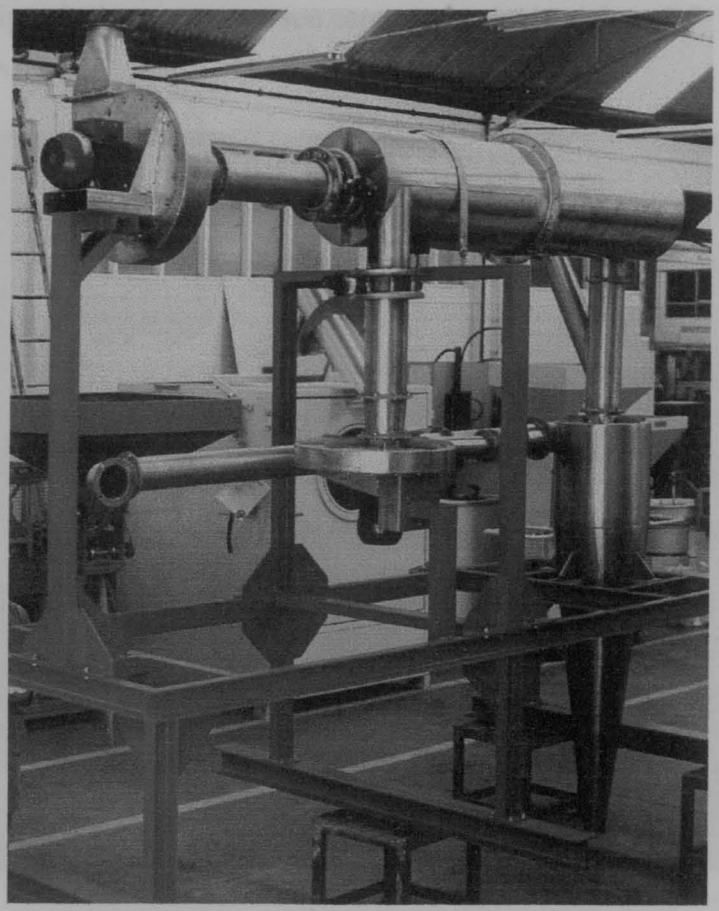


Figura 24 – Unidade piloto acabada na Azevedos Indústria, SA

A tarefa T4, *montagem dos elementos na instalação piloto*, foi concluída durante o mês de Setembro. A instalação teve de ser modificada ligeiramente *in loco*, de modo a serem acoplados: os módulos de medição de pressão, destinados a medirem a queda de pressão no ciclone e no concentrador; os módulos ópticos para medição da extinção luminosa por infravermelhos; e os pontos de amostragem para medição de velocidades, pressão, temperatura, humidade, e concentração de poeiras.

A Figura 25 mostra o quadro eléctrico da instalação, com os medidores ópticos (unidades de avaliação SICK). A Figura 26 mostra uma vista dos tubos de entrada e saída, com os opacímetros (emissor/reflector), as unidades A/D de pressão diferencial e três pontos de amostragem (entrada, recirculação e saída). A Figura 27 mostra em pormenor as unidades de pressão diferencial, e a Figura 28 um pormenor das tomas de pressão estática. A Figura 29 mostra uma vista lateral da instalação piloto, notando-se os ventiladores principal e de recirculação, a Figura 30 mostra a parte inferior do ciclone com o receptáculo de recolha e a Figura 31 um pormenor deste receptáculo, com poeiras recolhidas numa experiência preliminar. Finalmente, as Figuras 32 e 33

mostram a equipa técnica que teve a seu cargo o estudo do ciclone RS_VHE e sistema de recirculação.

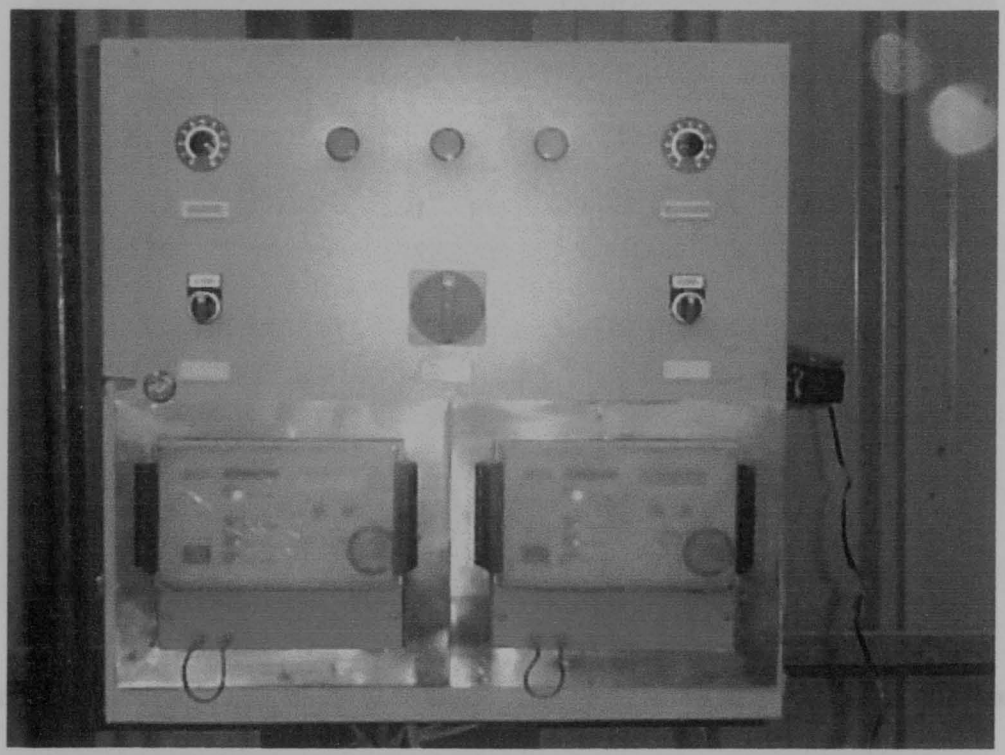


Figura 25 – Quadro eléctrico e unidades de avaliação dos opacímetros SICK

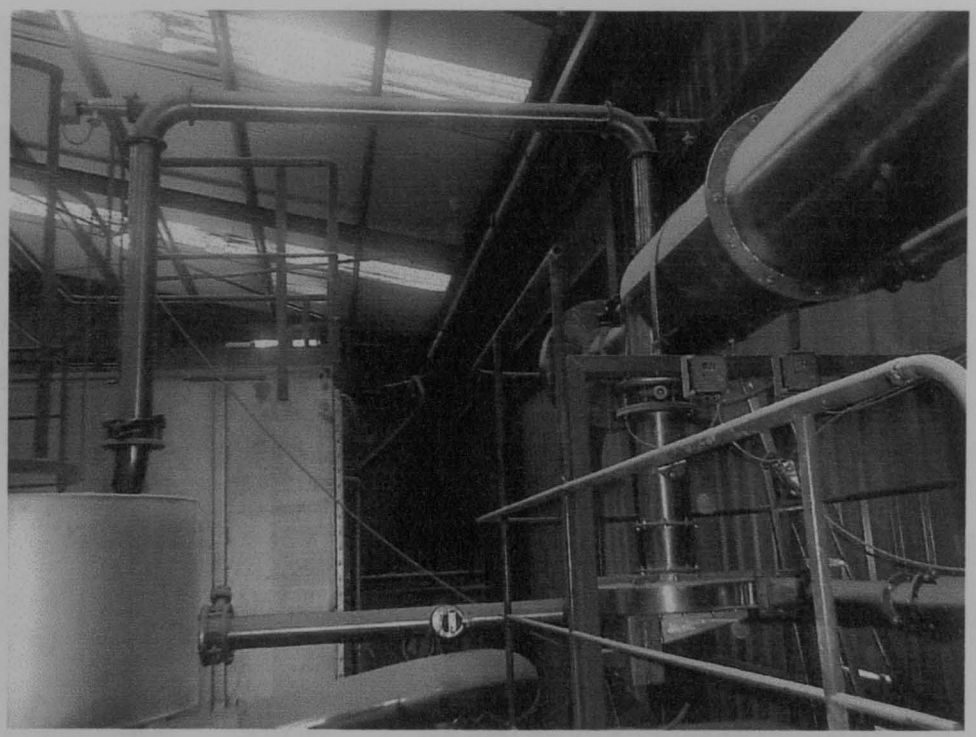


Figura 26 – Vista dos tubos de entrada (inferior) e de saída (superior), opacímetros e unidades de conversão A/D de pressão diferencial no ciclone e sistema

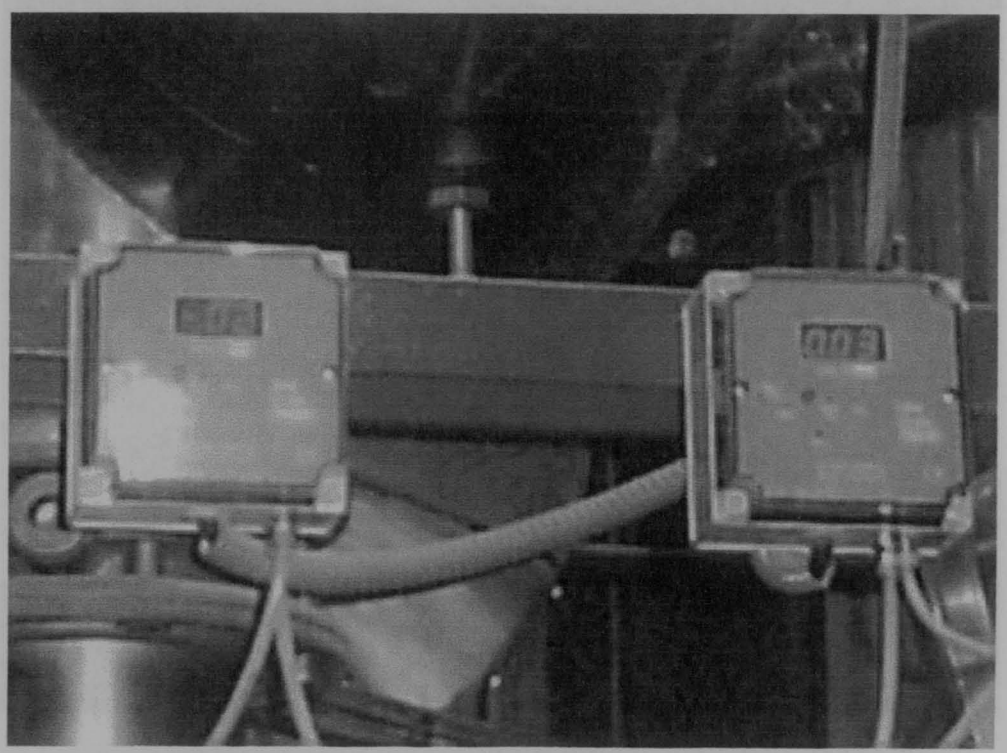


Figura 27 – Unidades de pressão diferencial para o ciclone e o sistema de recirculação

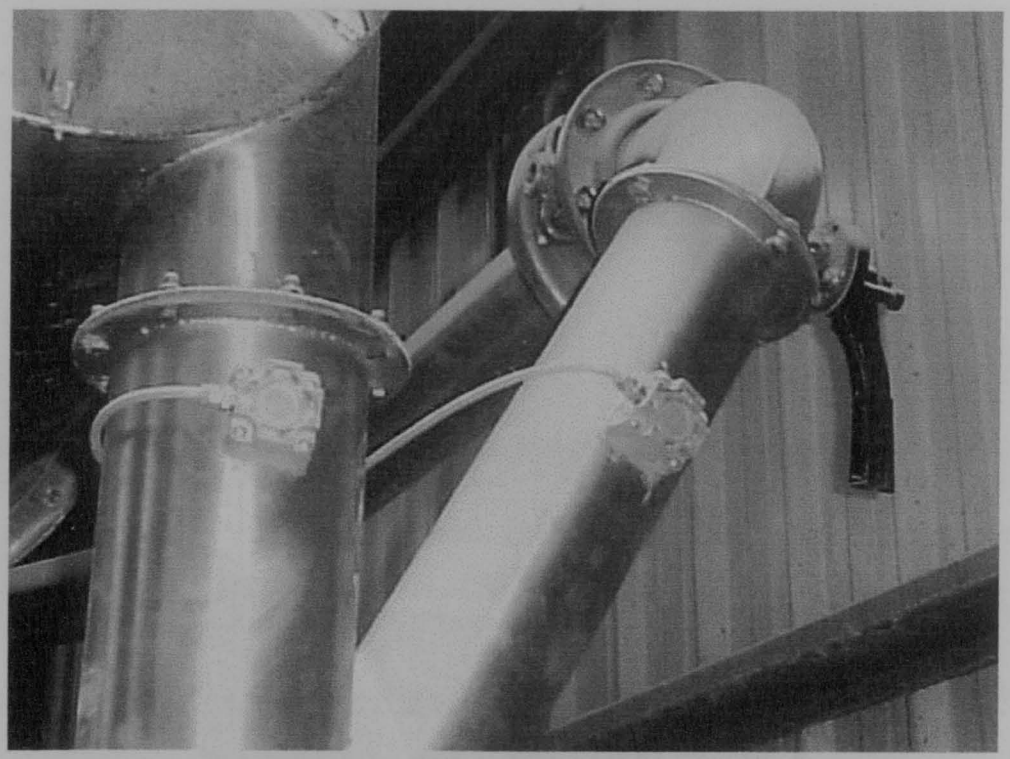


Figura 28 – Pontos de amostragem de pressão estática

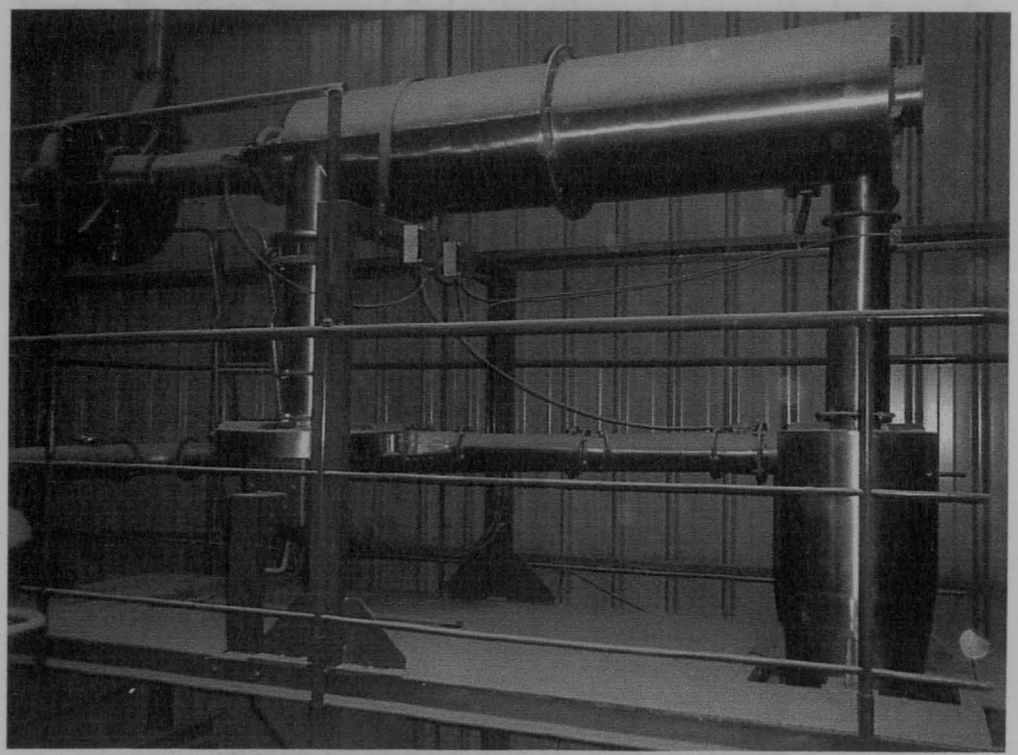


Figura 29 – Vista lateral da instalação piloto com ventilador principal e de recirculação

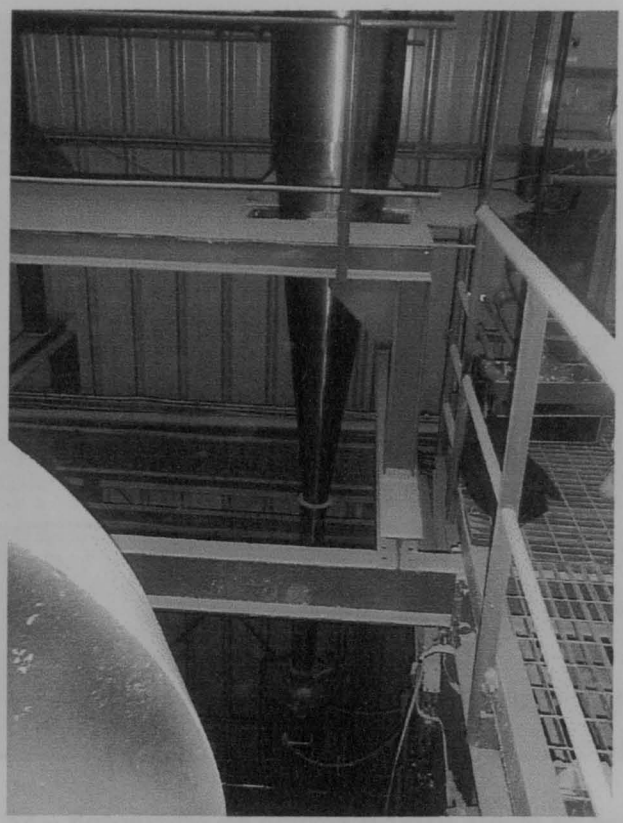


Figura 30 – Vista da parte inferior do ciclone com receptáculo de recolha

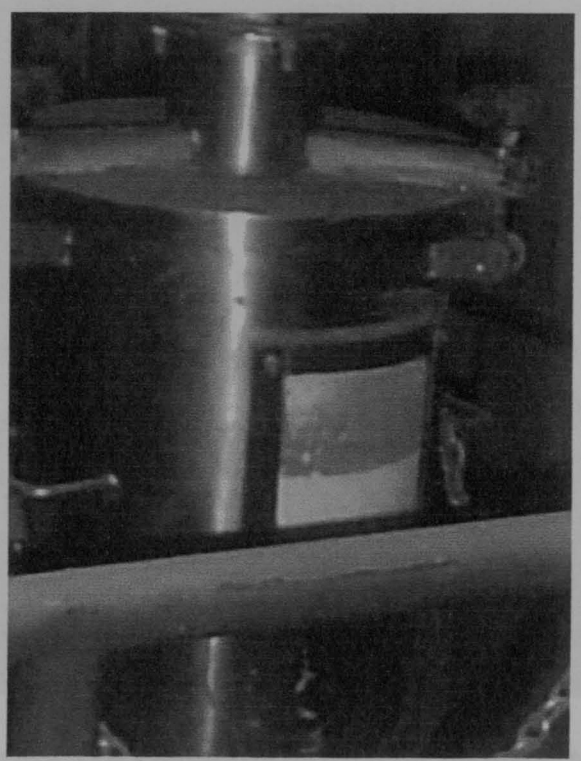


Figura 31 – Pormenor do receptáculo de recolha com janela de visita

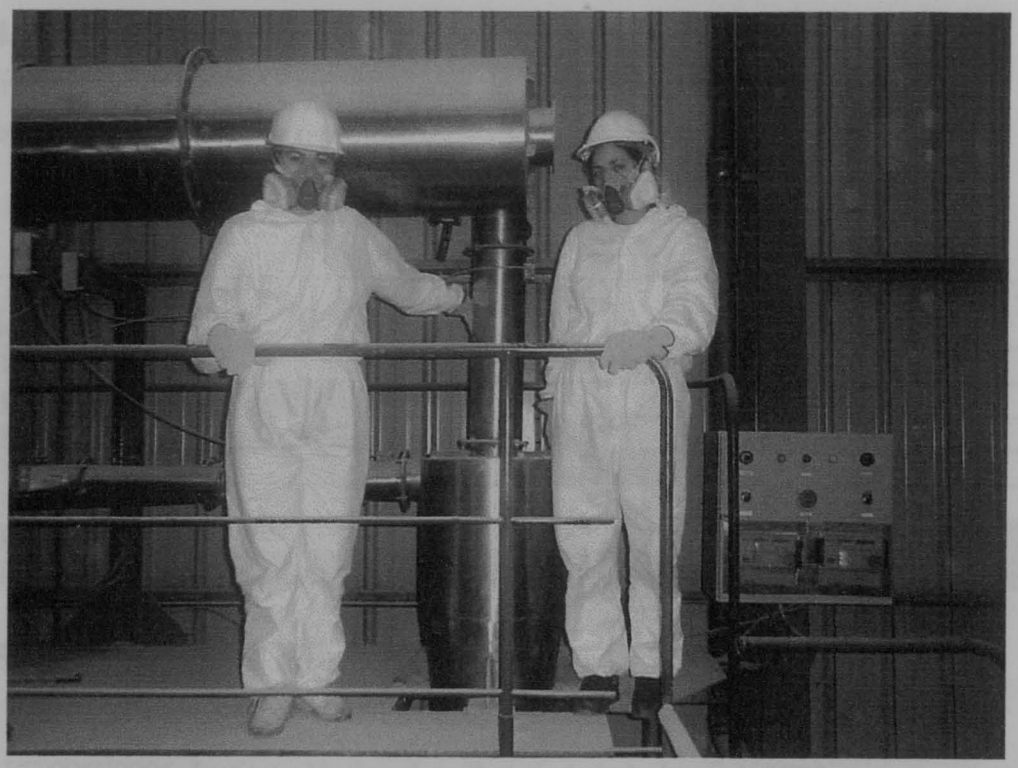


Figura 32 – Fotografia da equipa técnica afecta ao projecto

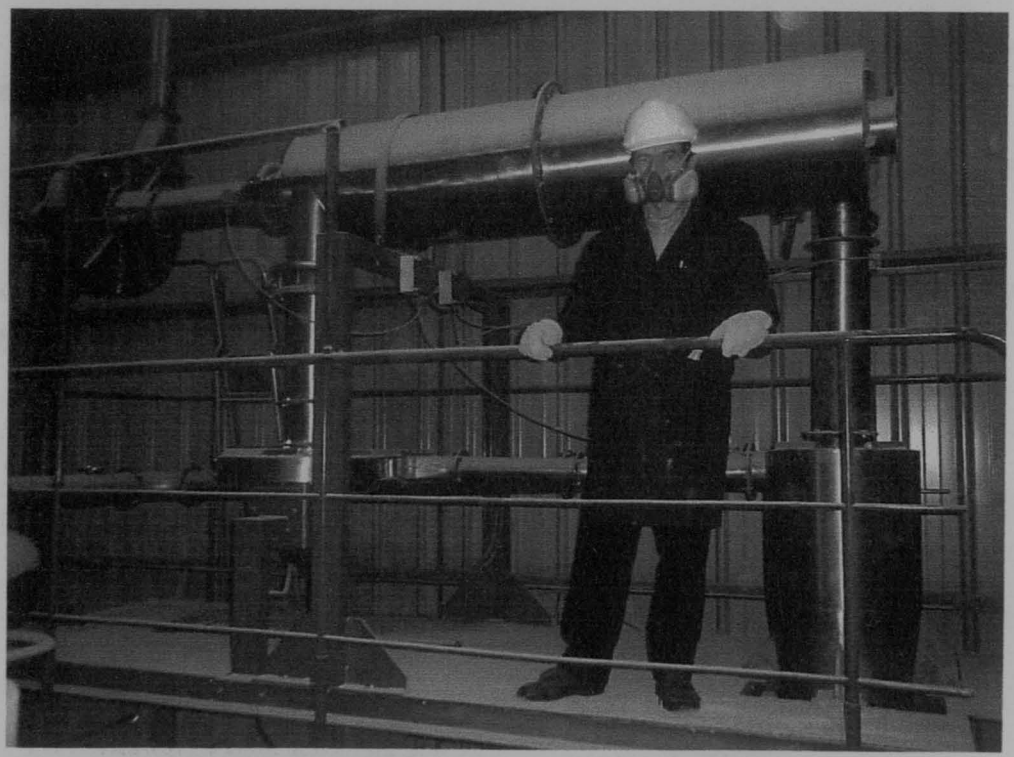


Figura 33 – Fotografia do director do projecto

BIBLIOTECA F.E. PORTO

3.4.2 Diagrama de Gantt

Apresenta-se de seguida em diagrama de Gantt na Tabela 5 a calendarização das tarefas cumpridas durante o projecto.

Tabela 5 – Diagrama de Gantt proposto e aprovado

	Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tarefa													
T1		■	■	■									
T2		■	■	■									
T3				■	■	■	■						
T4							■	■	■				
T5										■	■	■	
T6												■	■
T7		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

3.5 Referências Bibliográficas

1 – PT 102166, Instituto Nacional de Propriedade Industrial, **1998**.

2 – PE 99670006, Instituto Nacional de Propriedade Industrial, **1999**.

3 – PT 102392, Instituto Nacional de Propriedade Industrial, **1999**.

4 – R. Salcedo, *Candidatura ao financiamento da AI no projecto de desenvolvimento e implementação de uma instalação piloto do ciclone RS_VHE*, FEUP, **1998**

5 – M. Cândido, *Recuperação de poeiras finas com ciclones de recirculação – Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente*, FEUP, **1998**.

6 – R. Salcedo, *1º Relatório de Execução Material do Projecto P0060/IC-PME/I/II/M-RS_VHE*, FEUP, **2000**.

4 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO PILOTO

A presente Secção encontra-se dividida em duas partes fundamentais. Na primeira, apresenta-se o diagrama da instalação piloto e discutem-se brevemente as principais unidades processuais. É também objectivo desta secção elucidar sobre o funcionamento da instalação e da sua inserção no processo de produção de ácido sulfanílico na QUIMIGAL. Na segunda parte dá-se especial relevo aos instrumentos de medição e recolha de dados utilizados aquando da realização do trabalho experimental.

4.1 Diagrama do Processo

Para uma melhor compreensão da instalação piloto foi elaborado um diagrama de fluxo, tubagens e instrumentação que se apresenta seguidamente (Ver Diagrama da Instalação Piloto).

Como se pode observar esta instalação é constituída por dois equipamentos fundamentais, o ciclone RS_VHE (S-110) e o recirculador ou concentrador (S-111). Para vencer a queda de pressão necessária ao transporte do fluído no interior das condutas recorrem-se a dois ventiladores, que de acordo com a sua função, se designam de principal (L-113) e auxiliar (L-112).

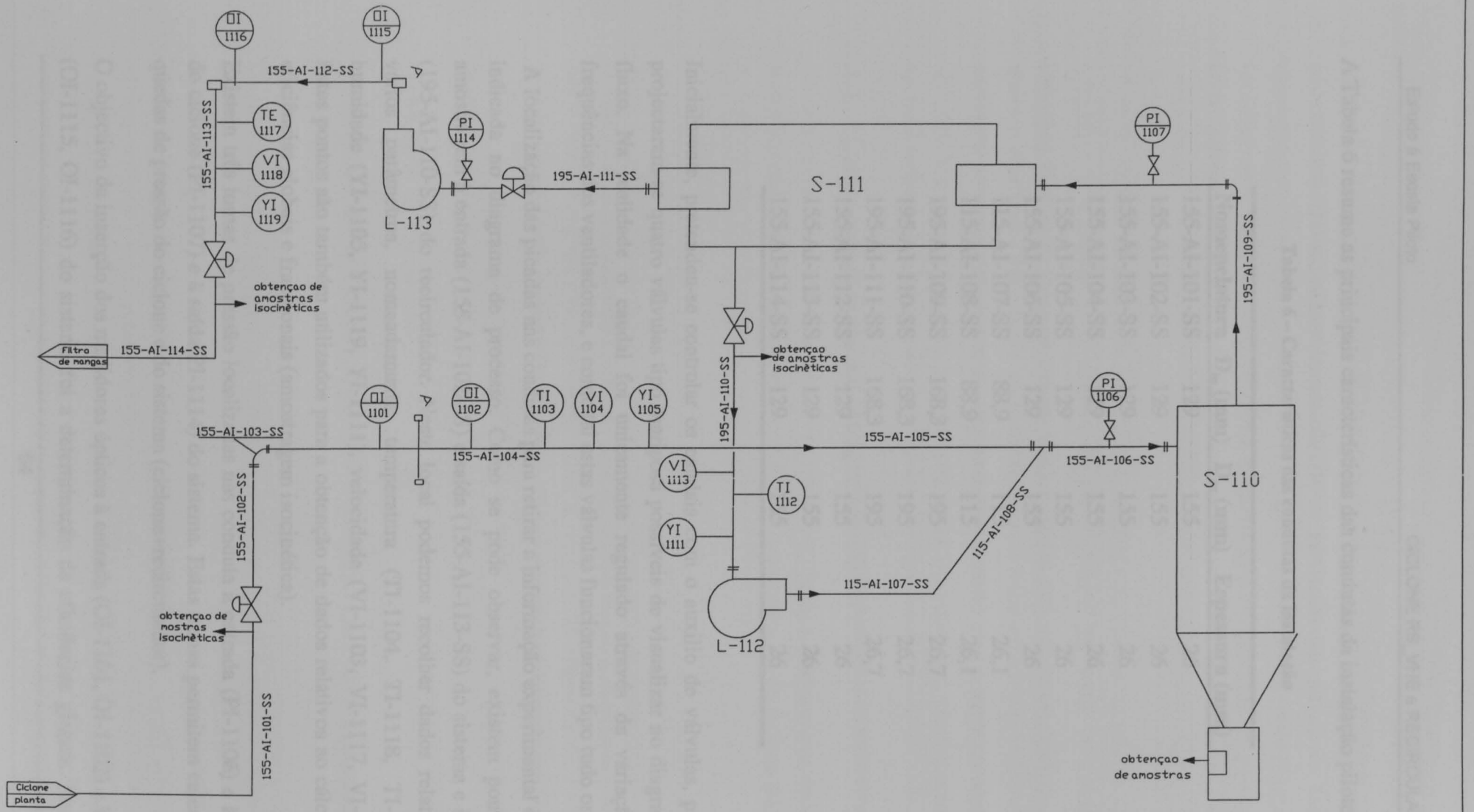
As tubagens do sistema estão indicadas de acordo com a seguinte nomenclatura:

diâmetro – designação - número identificativo – tipo de material

No esquema indica-se o *diâmetro* interno da conduta expresso em milímetros, este foi calculado de acordo o caudal médio esperado para o processo.

A *designação* refere-se ao fluído em circulação no interior das condutas, neste caso tratou-se de ar contaminado com partículas de ácido sulfanílico e adoptou-se a abreviatura AI.

O *tipo de material* utilizado para a construção das tubagens foi o aço inoxidável AISI 304L e denotou-se como SS.



S-111 Ciclone Recirculaçao

S-110 Ciclone principal

L-112 Ventilador principal

L-113 Ventilador auxiliar

Sistemas ópticos

	Data	Nome
Desenhado	22-01-01	Andreia.S.Pereira
Revisto	11-03-01	Andreia.S.Pereira

PROJECTO:
CICLONE RS_VHE
E SISTEMA DE RECIRCULAÇÃO
ESTUDO DA UNIDADE Á ESCALA PILOTO

Diagrama da Instalação Piloto

A Tabela 6 resume as principais características das condutas da instalação piloto.

Tabela 6 – Características das condutas da instalação

Nomenclatura	D_{in} (mm)	D_{ex} (mm)	Espessura (mm)
155-AI-101-SS	129	155	26
155-AI-102-SS	129	155	26
155-AI-103-SS	129	155	26
155-AI-104-SS	129	155	26
155-AI-105-SS	129	155	26
155-AI-106-SS	129	155	26
115-AI-107-SS	88,9	115	26,1
115-AI-108-SS	88,9	115	26,1
195-AI-109-SS	168,3	195	26,7
195-AI-110-SS	168,3	195	26,7
195-AI-111-SS	168,3	195	26,7
155-AI-112-SS	129	155	26
155-AI-113-SS	129	155	26
155-AI-114-SS	129	155	26

Inicialmente, pretendeu-se controlar os caudais com o auxilio de válvulas, para tal projectaram-se quatro válvulas tipo mariposa possíveis de visualizar no diagrama de fluxo. Na realidade o caudal foi unicamente regulado através da variação das frequências dos ventiladores, e como tal estas válvulas funcionaram tipo tudo ou nada.

A localização das picadas nas condutas para retirar a informação experimental é indicada no diagrama de processo. Como se pode observar, existem pontos de amostragem à entrada (155-AI-102-SS) e saída (155-AI-113-SS) do sistema e à saída (195-AI-110-SS) do recirculador. Neste local podemos recolher dados relativos a vários parâmetros, nomeadamente: temperatura (TI-1104, TI-1118, TI-1113), humidade (YI-1105, YI-1119, YI-1111), velocidade (VI-1103, VI-1117, VI-1112). Estes pontos são também utilizados para a obtenção de dados relativos ao cálculo de eficiências globais e fraccionais (amostragem isocinética).

Existem três tomas de pressão localizadas nas conduta à entrada (PI-1106) e à saída do ciclone (PI-1107) e à saída(PI-1114) do sistema. Estas tomas permitem calcular as quedas de pressão do ciclone e do sistema (ciclone+recirculador).

O objectivo da inserção dos medidores ópticos à entrada (OI-1101, OI-1102) e à saída (OI-1115, OI-1116) do sistema foi a determinação de eficiências globais. Porém, a

correlação obtida entre os valores de extinção e a concentração mássica de partículas não resultou fiável, possivelmente devido a partículas de diferentes tamanhos apresentarem diferentes factores de reflexão. Sendo assim, estes medidores limitaram-se a fornecer indicações para a interrupção do processo de produção de ácido sulfanílico aquando do registo de anomalias e dos tempo de amostragem convenientes.

O gás de entrada contaminado com pó é proveniente do ciclone da fábrica de ácido sulfanílico e é conduzido directamente para o ciclone RS_VHE. A maioria das partículas descem ao longo do ciclone e ficam retidas num recipiente existente para o efeito, e o ar agora mais limpo sai radialmente pela parte superior da unidade. Após passagem no concentrador o ar é completamente escoado para o filtro de mangas da QUIMIGAL, se se operar sem recirculação. Se se funcionar com recirculação, parte do gás é recirculado e mistura-se com o de entrada para entrar de novo no ciclone.

4.2 Instrumentos de Medida

No decurso do trabalho experimental recorreu-se a diversos instrumentos de medida para a determinação dos parâmetros necessários à caracterização do ciclone RS_VHE. A descrição dos aparelhos que se segue é sumária e visa referir alguma da informação técnica disponível.

4.2.1 TESTO

O TESTO é um instrumento portátil de medida, multifacetado e de prática utilização. Entre outras funções, este aparelho permite a medição de temperatura, humidade, pressão, intensidade e velocidade do ar. Estes parâmetros apresentam especial interesse para o trabalho experimental desenvolvido na instalação piloto, e serão descritos, com algum pormenor.

- **Medição da Temperatura**

O TESTO inclui uma conexão rápida e fiável de sondas termopares ou sondas Pt100 de elevada precisão [1].

De entre as muitas vantagens que o instrumento de medição apresenta salientam-se:

- Calibração-ajuste do sistema termopar rápido;
- Alarme óptico e acústico especifico para cada situação;
- Conexão à rede e recarga de pilhas no instrumento;
- Adequado à analise de dados;

- Conversão A/D com dois canais independentes.

A gama de temperaturas passível de medição no TESTO depende do tipo de sonda seleccionada. Sendo assim, para as diferentes sondas tem-se:



- Tipo K: -200 a +1370ºC
- Tipo S: -50 a +1700ºC
- Tipo T: -75 a +400ºC
- Pt100: -200 a +800ºC
- NTC: -50 a +150ºC

A exactidão para cada uma das sondas é:
- Tipo K: ±0,3ºC
- Tipo T: ±0,5 % (só se aplica ao valor maior)
- Pt100: ±0,2ºC o ±0,3% (só se aplica ao valor maior)
- NTC: ±0,2ºC (-25 a +74,9ºC)
  ±0,4ºC (+75 a +99,9ºC)
  ±0,5% (só se aplica ao valor maior)

A resolução do aparelho, no caso da medição de temperatura, situa-se nos 0,1ºC.

- **Medição da Humidade**

As medições de humidade no ar ou em gases industriais tornam-se cada vez mais importantes. A melhoria constante dos processos técnicos, as crescentes exigências de qualidade e redução de custos de energia, requerem medições precisas de humidade relativa ou absoluta e ponto de orvalho [1]. Nas análises em questão foi utilizada uma sonda dupla (humidade, temperatura) disponível no mercado.

- **Medição da Velocidade do Ar**

A TESTO desenvolveu e produziu instrumentos de medida utilizando três diferentes tecnologias de medição [1]:

- Sondas térmicas de velocidade utilizáveis em medições precisas numa gama entre 0 e 5m/s;
- Sondas tipo molinete ideais para velocidades entre 5 e 40m/s;
- Tubos de Pitot que permitem resultados óptimos quando se verificam altas velocidades.

O TESTO dispõe de vários acessórios que permitem e potencializam a sua utilização:

- *Impressora TESTO*: Imprime os dados de medição, situação, nomes do produto;
- *Alimentador*. Para alimentação à rede e recarga de pilhas no instrumento;
- *Comfort software "Light"*: Para a gestão de dados, com função de gráficos e análise, e base de dados;
- *Comfort software "Professional"*: Para a gestão de dados, com função de gráficos e adequada análise, base de dados, análise de dados;
- *Cabo RS"232"*: ligação do instrumento de medição a PC para transmissão de dados [1].

4.2.2 Tubo de Pitot

O Tubo de Pitot consiste basicamente num tubo delgado colocado paralelamente ao fluxo do gás com um orifício no extremo colocado contra o fluxo do fluido para obter a pressão total e outro perpendicular a este que obtém a pressão estática.

O trabalho experimental iniciado por Henry Pitot, em 1732, cria as bases para a medição de pressão no ponto de estrangulamento do fluído ao demostrar que um pequeno tubo com um extremo dirigido contra a corrente, proporciona um dispositivo para a medição da velocidade [2,3].

4.2.3 Monitor de Concentração de Partículas

- **Características do Monitor**

Utilização

O *FW 56-1 Dust Monitor* é um transmissor óptico de infravermelhos que não contém partículas móveis e portanto apresenta elevada segurança e uma vida longa.

O *FW 56-1 Dust Monitor* é utilizado nos seguintes casos [4]:

- Amostragens de pó em condutas gasosas;
- Sistemas de filtros para testar capacidades funcionais;
- Detecção de falhas de filtros individuais (filtros rompidos);
- Medição de emissões de instalações industriais para testar concordância com valores limite;
- Amostragens de opacidade ou transmissão em condutas de gás.

Aspectos

A transmissão de sinal é processada flexivelmente e é possível a adaptação deste a diversas gamas de concentração.

Com este equipamento pode-se efectuar a medição continua de transmissão, transmissão diferencial, opacidade, extinção, extinção diferencial e concentração de pó em mg/m^3 (depois de se efectuarem medições da concentração gravimétrica).

Este monitor apresenta características que permitem uma fácil utilização e uma boa relação preço/qualidade, entre outras podem-se destacar [4]:

- Armazenamento de 5000 valores medidos num intervalo de 15min a 2hr;
- Registro de 500 dados com data e hora;
- Amostragem de valores via analógica (sinal 0-20mA), com variável eficaz zero (0/2/4 mA);
- Boa parametrização de medidas com PC via RS 232 sobre o painel frontal utilizando o *software* MEPA;
- Interface opcional RS 485/RS 422 para dados transferidos por controle remoto;
- Instalação simples e baixa manutenção.

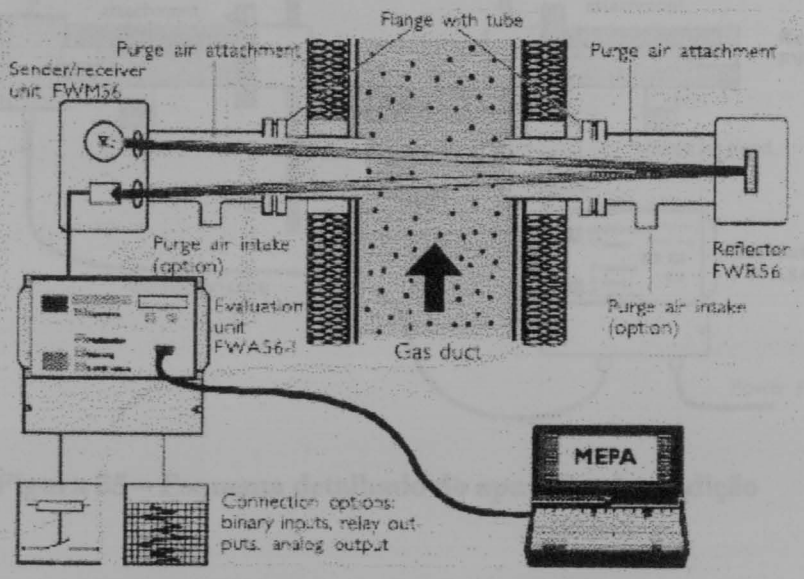


Figura 34 – Esquema do aparelho de medição

- **Componentes**

1. FWM56: unidades remetente/destinatário – As unidades remetente/destinatário contêm os módulos ópticos e electrónicos para transmitir e receber as radiações infravermelhas;
2. FWR56-2 ou FWR56-4: reflector – Utilizado para curtas e longas distâncias entre os FWM56, com suporte de segurança sobre a purga de ar;
3. FWA56-1: unidade de avaliação – A unidade de avaliação contém os componentes electrónicos para as amostragens e cálculos de valores e sinais de entrada e saída. Esta unidade incluí um painel onde se indica: o estado do instrumento e as variáveis medidas. Existe uma interface RS232 que está situada na parte central do painel para definir os parâmetros e mudar os dados;
4. Dois FW556: uniões da purga de ar – As uniões da purga de ar contem lâminas no seu interior para proteger os suportes ópticos da contaminação. Dependendo da temperatura e da pressão do gás, outra purga de ar pode ser ligada aos medidores;
5. MEPA[1] 561 – *Software* necessário para configurar o instrumento antes de se iniciarem as medições [4].

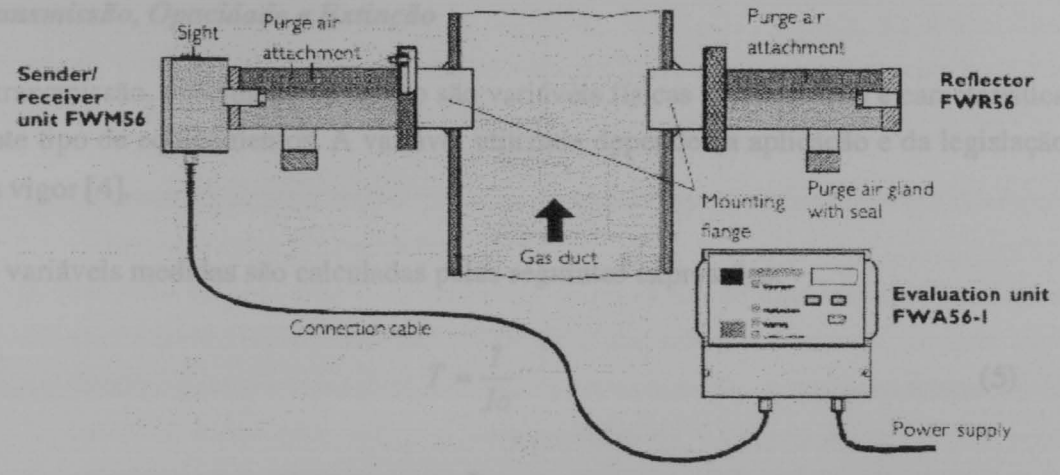


Figura 35 – Esquema detalhado do aparelho de medição

[1] Menu Drive Parametrization

- **Modo de Operação**

Função

O sistema óptico da unidade remetente/destinatário FWM56 compreende um conjunto de lentes receptoras e emissoras de radiação. A radiação electromagnética, cuja fonte é um díodo de infravermelhos, atravessa o pó e o gás da conduta até o reflector e depois é reflectida de volta na unidade S/R. A luz atenuada pelas partículas de poeira é registrada no receptor e depois convertida na unidade de avaliação num sinal eléctrico (sob a forma de intensidade da corrente – ampere) [4].

As medições de radiação são afectadas pela temperatura ambiente, deste modo este parâmetro é monitorizado continuamente e é efectuada uma correcção nos valores medidos. Os valores transmissão são insensíveis à luz do dia, visto que os sinais transmitidos são filtrados através de filtros passa-alto.

Os valores corrigidos e calibrados determinam-se 50 vezes por segundo e representam valores instantâneos (emissão de sinal por pulsos).

O valor de intensidade básica – ***Io*** representa a quantidade de luz detectada sobre uma secção que está totalmente livre de pó. Este valor está armazenado no sistema e determina-se durante a fase de calibragem do aparelho.

Transmissão, Opacidade e Extinção

A transmissão, opacidade e extinção são variáveis físicas cuja medição é característica neste tipo de equipamentos. A variável utilizada depende da aplicação e da legislação em vigor [4].

As variáveis medidas são calculadas pelas seguintes expressões:

$$T = \frac{I}{Io} \tag{5}$$

$$O = 1 - \frac{I}{Io} = 1 - T \tag{6}$$

$$E = \log\left(\frac{Io}{I}\right) = \log\left(\frac{1}{T}\right) \tag{7}$$

Sendo: T - transmissão, O – opacidade e E – Extinção.

Os valores de transmissão e opacidade são expressos normalmente em percentagem, devendo então ser multiplicados por um factor de 100. O valor logarítmico da extinção é proporcional à concentração de pó (para partículas com granulometria uniforme e distribuição homogénea).

Transmissão Diferencial

O aparelho realiza 50 amostragens individuais por segundo, sendo o valor médio de transmissão absoluta realizado num período de 5 minutos – T_{5min}. A transmissão diferencial – ΔT calcula-se por subtracção progressiva dos valores de transmissão instantâneos de T_{5min} [4].

Uma pequena alteração na transmissão (e.g. contaminação, temperatura, desvio dos feixes) não afecta de forma significativa as medidas de transmissão diferencial. Através deste modo de cálculo podemos combater a elevada sensibilidade das medidas de transmissão.

As medidas de transmissão diferencial podem ser calculadas com um nível de contaminação de pó sobre superfície das lentes superior a 50%. Uma alteração no valor da transmissão diferencial em princípio só é detectada para $\Delta T \geq 0{,}2\%$.

Concentração de Pó

A concentração de pó normalmente é requerida em mg/m^3, e pode ser determinada através de duas variáveis distintas. Estas seleccionam-se antes do início das medições e mantêm-se fixas como parâmetros [4].

1. No caso de concentrações grandes de partículas, aproximadamente $50mg/m^3$, utiliza-se a extinção padrão;
2. No caso de pequenas concentrações de pó utiliza-se uma variável baseada na transmissão diferencial. Este método é muito fiável e sensível, apresentando a vantagem de ser insensível ao nível de contaminação. A medição é baseada em relações monótonas entre o valor médio de transmissão e as flutuações estatísticas (muito pequenas) em redor do valor médio.

BIBLIOTECA F.E. PORTO

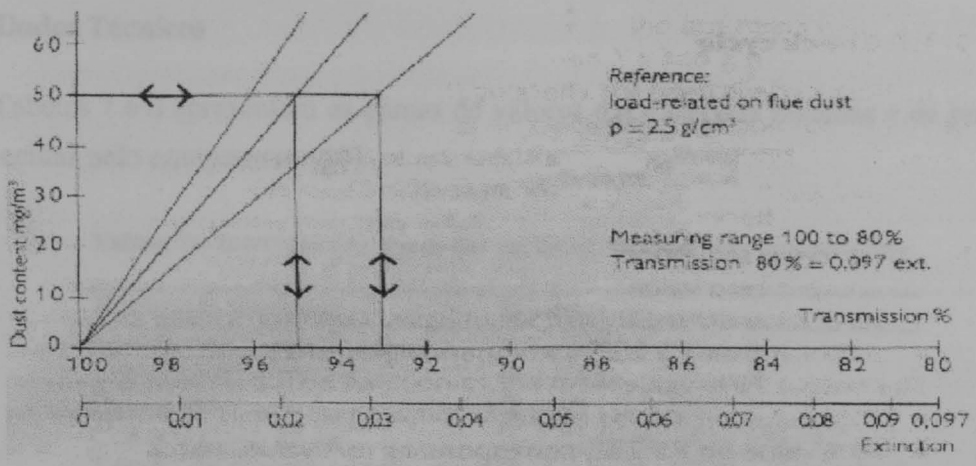


Figura 36 – Concentração mássica *versus* extinção

Para as experiências efectuadas na instalação piloto foi utilizado o último método proposto, encontrando-se as correlações entre intensidade e concentração incluídas no Anexo A.

Extinção Diferencial

O cálculo da extinção diferencial – ***ΔE*** é similar ao da extinção padrão [4]:

$$\Delta E = \log\left(\frac{1}{1-\Delta T}\right) \tag{8}$$

O termo T da equação 7 é substituído por 1-ΔT, uma vez que se a transmissão diferencial numa secção livre de pó é nula então o valor de transmissão é unitário.

O cálculo da concentração de pó a partir de valores de extinção diferencial com uma precisão satisfatória, é efectuado mediante o valor médio. A extinção e a concentração de pó dependem tanto do tamanho das partículas e da densidade como da secção medida, esta relação deve ser determinada por um procedimento de calibragem utilizando uma medição gravimétrica de comparação. Os coeficientes calculados, por ajuste linear ou regressão quadrática são introduzidos no equipamento por meio da equação [1]:

$$C = A_2 \cdot x^2 + A_1 \cdot x + A_0 \tag{9}$$

sendo: C – concentração de pó em mg/m^3; A_o, A_1, A_2 – coeficientes de regressão e x – extinção ou extinção diferencial.

- **Dados Técnicos**

As Tabelas 7 e 8 apresentam as gamas de valores das variáveis medidas e de precisão fornecidas pelo equipamento [4].

Tabela 7 – Intervalo de valores das variáveis medidas pelo equipamento

Variáveis medidas	Gamas
Transmissão, opacidade	0 - 100%
Transmissão diferencial	0 – 100%
Extinção	0 – 0,3 ; 0 – 1,5
Concentração de pó	0 – 20mg/m^3 ; 0 – 100g/m^3
Tempo de reposta	0,1 – 120s (ajustável livremente)

Tabela 8 – Precisões do equipamento

Precisão	Gamas
Transmissão	± 0,4%
Opacidade	± 0,4%
Transmissão Diferencial	± 0,04%
Extinção	± 0,002
Extinção Diferencial	0,0002

4.2.4 Amostrador Isocinético

- **Princípios de Operação**

Neste trabalho foi utilizado um amostrador isocinético da Andersen, modelo M9096. A amostragem de gás deve ser efectuada num período de tempo determinado e a um caudal e volume conhecidos. O pó extraído é separado através de um filtro pré-pesado, que é posteriormente seco e repesado. O aumento de peso do filtro é atribuído ao pó colectado durante o processo da amostragem, o qual permite calcular a concentração das partículas no gás [5].

As medições consideram-se válidas quando se verificam as seguintes condições experimentais [5]:

1. O gás na tubagem e no ponto de amostragem é suficiente homogéneo e apresenta uma velocidade estável;
2. A amostra é recolhida sem provocar alterações no gás com recurso a uma ponteira de sonda de baixo diâmetro e em condições isocinéticas;

3. As amostras são recolhidas num determinado número de posições no plano de amostragem, de forma a permitir uma distribuição uniforme do pó na conduta;
4. O manuseamento da amostra deve ser realizado de forma a não ocorrer condensação e sempre sem retirar o pó do filtro colector;
5. Os procedimentos de amostragem e pesagem devem ser adaptados às quantidades de amostra recolhidas.

- **Localização dos Pontos de Amostragem**

Considera-se uma amostragem representativa quando a localização do ponto de amostragem permite a recolha e o gás não apresenta nesse local turbulência significativa.

Plano de Amostragem

O plano de amostragem deve estar situado numa zona recta e preferencialmente vertical, com uma forma e secção de área transversal constantes. Desta forma evitam-se obstruções na tubagem que possam originar perturbações ou mesmo mudanças de sentido no fluxo de gás [5].

O plano de amostragem deve satisfazer os seguintes requisitos:

1. O ângulo entre o fluxo de gás e a ponteira de sonda deve ser inferior a 15°;
2. Não pode existir fluxo de gás em sentido negativo;
3. A velocidade mínima depende do método de amostragem utilizado, para tubos de Pitot a queda de pressão diferencial deve ser superior 5Pa;
4. A razão entre a velocidade mais alta, do gás na conduta, e a mais baixa, no tubo de Pitot, deve ser menor do que 3:1.

Localização e Quantidade Mínima de Pontos de Amostragem

O número mínimo de pontos de medida depende das dimensões do plano de amostragem. Em geral, este número aumenta quando aumentam as dimensões do plano.

As Tabela 9 e 10 apresentam o número mínimo de pontos de amostragem para o caso de tubagens circulares e rectangulares, respectivamente. Os pontos de amostragem devem localizar-se na periferia de anéis de igual área interior. Os pontos de amostragem não se devem localizar a distâncias inferiores a 5cm do interior da parede da conduta.

Quando os requisitos para o plano de amostragem não podem ser satisfeitos, é possível efectuar amostras representativas incrementando o número de pontos segundo se específica na Tabelas 9 [5].

Tabela 9 – Número mínimo de pontos de amostragem para condutas circulares

Gama das áreas do plano de amostragem (m^2)	Gama dos diâmetros da tubagem (m)	Número mínimo de linhas de amostragem (diâmetros)	Número mínimo de pontos de amostragem por diâmetro		Número mínimo de pontos de amostragem por plano	
			Ponto central		Ponto central	
			Incluído	Excluído	Incluído	Excluído
< 0.09	<0.35	-	1 [1)]	-	1 [1)]	-
0.09 a 0.38	0.35 a	2	3	2	5	4
0.38 a 0.79	0.70	2	5	4	9	8
0.79 a 3.14	0.70 a	2	7	6	13	12
>3.14	1.00	2	9	8	17	16
	1.00 a 2.00					
	>2.00					

[1)] Utilizar somente um ponto de amostragem, caso contrário aumentam-se os erros

- **Modo de Operação**

Medição de Velocidades e Composições

As medidas de velocidade podem realizar-se utilizando tubos de Pitot padronizados, ou calibrando outro tipo de tubos já estandardizados tendo como referência o tubo de Pitot [5].

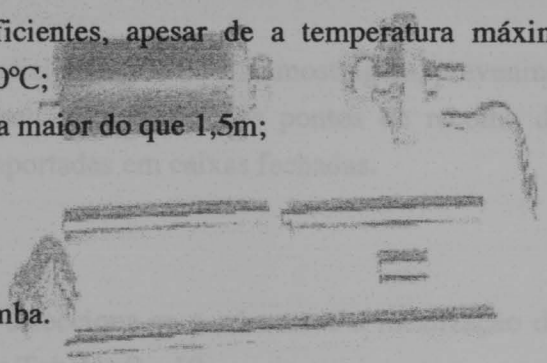
A temperatura e a pressão do gás devem ser medidas para posteriormente se calcular a densidade do gás (na ordem de ±0,05kg/m^3). Desta forma é possível obter o valor da composição.

Durante a amostragem é preciso testar a velocidade do gás amostrado, de tal forma que possamos observar possíveis variações na velocidade do gás na conduta.

Equipamento de Amostragem

Este equipamento é constituído pelos seguintes elementos [5]:

1. Ponteira de sonda e peça de conexão;
2. Compartimento para filtro que inclui um suporte de filtro e um filtro de superfície plana. Num teste utilizando um aerossol com uma quantidade máxima de partículas de diâmetro 0,3μm, a eficiência do filtro deverá ser superior a 99,5%. Quando o aerossol é constituído por partículas de diâmetro 0,6μm, a eficiência deverá ser maior do que 99,9%.
   Os filtros de fibra de vidro reagem com componentes ácidos como o SO_3, os quais provocam um incremento do seu peso, por esse motivo somente podem ser utilizados quando o gás não tem componentes ácidos.
   Os filtros de fibra de quartzo demostram ser eficientes em muitos casos, apesar das suas propriedades mecânicas.
   Os filtros PTFE também são eficientes, apesar de a temperatura máxima admitida não poder exceder os 230ºC;
3. Suporte extensível para uma sonda maior do que 1,5m;
4. Câmara de secagem;
5. Tubos de amostragem;
6. Linha de conexão;
7. Medidor de fluxo, regulador e bomba.



Equipamento Opcional para Amostragem de Gás

Este equipamento utiliza-se quando os componentes gasosos vão ser recolhidos a jusante do filtro (adsorção, absorção).

No caso de fazer uma monitorização dos componentes gasosos deve ser feito um teste de aquecimento.

Acondicionamento e Secagem de Filtros

O equipamento necessário para a secagem e pesagem dos filtros é [5]:

1. Forno de secagem – forno de secagem de laboratório controlado termicamente com uma tolerância de ±5º;
2. Excicador – contém um agente excicante (e.g. silicagel, cloreto de cálcio);
3. Balança – com resolução de 0,01mg a 0,1mg, a gama deve ser compatível com a massa de partículas a pesar;

4. Para determinar o tempo de resposta da balança, utiliza-se uma amostra com peso conhecido;
5. Termómetro e barómetro no mesmo compartimento onde se efectuam as medições.

- **Amostragem e Pesagem**

Preparação

Os equipamentos devem ser previamente limpos, preparados e testados. Deve-se ter especial atenção na limpeza dos suportes para filtros e dos componentes da ponteira de sonda, pois da ausência completa de contaminantes depende a qualidade dos resultados na pesagem [5].

Dependendo das medidas que vão ser tomadas os filtros e as partes associadas devem ser pesadas para cada amostragem.

São recomendadas protecções de filtros adicionais para cada amostragem, prevenindo desta forma um excesso de manuseamento dos filtros nos pontos de recolha das amostras. Todas as partes devem ser transportadas em caixas fechadas.

Pre-medição

Dependendo das dimensões da conduta, selecciona-se o número e a localização dos pontos de amostragem como se ilustra nas Tabelas 9 e 10.

Deve-se medir também a temperatura e a velocidade nos pontos seleccionados da conduta, averiguando possíveis desvios do fluxo de gás. As variações de fluxo de gás na conduta podem-se testar utilizando um tubo Pitot.

A temperatura e/ou a concentração de CO_2/O_2 na conduta (ou outros parâmetros relevantes) devem indicar que o sistema se encontra em estado estacionário.

A selecção do diâmetro do bico de Nozzle em cada um dos pontos de amostragem requer a medição de velocidades e a elaboração de cálculos preliminares [5].

Amostragem

1. Encher a sonda com silicagel, se for necessário;
2. Dependendo das condições padrão utilizadas, aquecer as partes do equipamento relevantes até uma certa temperatura. Esta acção pode prevenir a

condensação aquando da introdução do receptáculo do filtro frio num local mais quente;

3. Assegurar que a sonda está inserida dentro da conduta e alinhada com o fluxo de gás, utilizando para tal o indicador de direcção de fluxo;
4. Ajustar a velocidade de fluxo para obter uma amostragem isocinética entre ±10%. A velocidade de fluxo é determinada com recurso ao gráfico utilizado para a escolha do diâmetro da ponteira de sonda;
5. A duração da amostragem em cada ponto pode ser idêntica ou não, dependendo das normas empregues para a amostragem. Os diversos métodos estandardizados (e.g. BS3405, ISO9096) ditam iguais intervalos de amostragem para diferentes fluxos, em cada ponto. O método mais simples é utilizar um tubo Pitot transversal e testar os valores de fluxo de gás;
6. A amostragem deve-se realizar pelo menos durante 5 minutos, sendo o valor de velocidade ajustado para uma variação de ±10% das condições isocinéticas;
7. Não se deve interromper a recolha de amostra quando movemos a sonda entre os pontos de amostragem. O ajuste de velocidades deve ser efectuado imediatamente. Deve-se recordar a duração da amostragem e a relação volume/fluxo para cada ponto;
8. Uma vez completas todas as medições deve-se desligar a bomba e retirar a sonda da conduta;
9. No final da amostragem retirar a sonda cuidadosamente, recolher o filtro e transportar o seu conteúdo para uma caixa fechada;
10. As partículas que não são recolhidas no filtro podem ser retiradas mediante acetona ou álcool e pesadas após a evaporação das substâncias voláteis no laboratório;
11. Verificar a cor da silicagel no final da experiência, se esta tiver alterado deve-se substituir o enchimento da coluna;
12. Deixar a sonda preparada para a experiência seguinte [5].

Pesagem

A quantidade de pó recolhida é calculada por diferença entre duas pesagens, no inicio e no final de cada amostragem. Deve-se ter especial cuidado para não cometer erros no manuseamento dos filtros, e estar atento a alterações de temperatura ou humidade;

Antes de cada pesagem:

1. O balança deve ser calibrada com pesos padrão convenientes;

2. Apontar as condições de pressão, temperatura e humidade no compartimento onde se efectua a pesagem.

Se o peso das partículas é substancialmente grande (na gama de 50g), a temperatura e a pressão barométrica influem no peso aparente, sendo então necessário efectuar-se uma correcção [5].

Também se deve ter cuidado com o aumento ou a diminuição de peso quando:

1. Existem cargas electrostáticas que podem ser neutralizadas ou descarregadas;
2. O material do filtro exibe características higroscópicas que são susceptíveis de aumentar o peso. Por esta razão a pesagem deve ser realizada nos três minutos que sucedem a retirada da amostra do exsicador. Devem ser realizadas três medições com 1, 2 e 3min de intervalo. Se um aumento significativo for detectado a amostragem deve ser introduzida no exsicador por um período de pelo menos 4hr. O procedimento de pesagem deve ser então repetido. A referência para o peso do conjunto filtro e pó secos será então calculada por extrapolação para o instante inicial.

Tratamento de Pós-amostragem dos Filtros e do Tubo de Sonda

Os filtros devem ser secados durante uma hora a 160ºC. O dissolvente deve ser decantado, e aquecido até a evaporação [5].

4.3 Referências Bibliográficas

1 – http://www.testo.com.br

2 – http://www.isec.pt/mecanica/cursos/disciplinas/electromecanica/fluidos.htm

3 – http://cipres.cec.uchile.cl/~legutier

4 – FW 56-1: Dust Concentration Monitor, SICK.

5 – M9096: Sample Train for Stack Sampling Instrituion and Operation Manual, **1997**.

5 RESULTADOS

Nesta Secção apresentam-se os resultados obtidos após a fase experimental do projecto. A Figura 37 representa o esquema seguido para a recolha dos parâmetros necessários para a caracterização do ciclone RS_VHE.

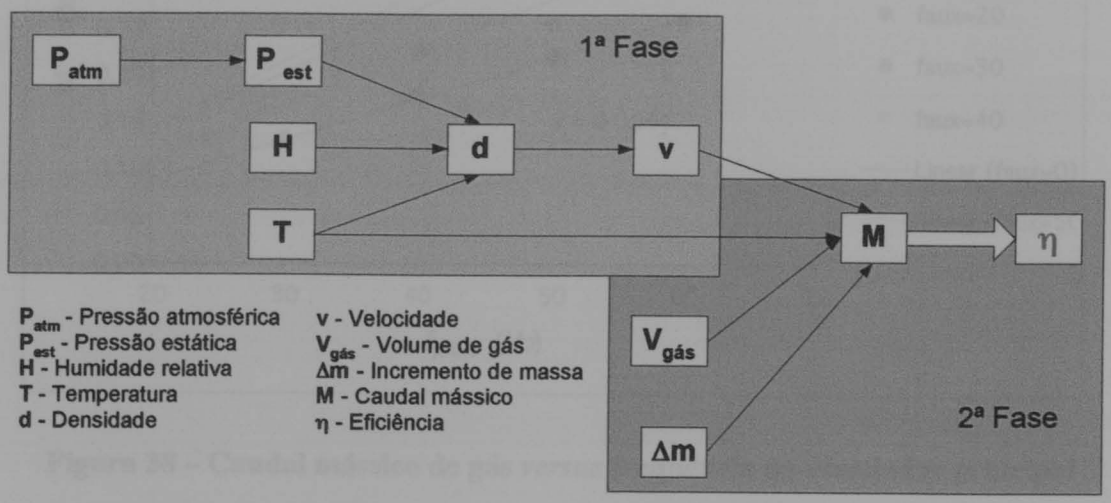


Figura 37 – Recolha de informação experimental

Como é possível observar-se da Figura 37, o trabalho experimental foi realizado em duas etapas distintas. A primeira consistiu na recolha da informação necessária à obtenção dos valores de velocidade do gás em diversos pontos da conduta. Na segunda, calculou-se a eficiência a partir dos dados recolhidos mediante a utilização de um amostrador isocinético.

5.1 Determinação de Parâmetros

Com base nos dados obtidos na 1ª Fase do trabalho é possível calcularem-se os caudais de entrada e de recirculação do gás. Estes podem ser expressos em termos mássicos ou volúmicos.

5.1.1 Relação entre a Frequência do Ventilador Principal e os Caudais Mássicos à Entrada do Ciclone

Os caudais alimentados ao ciclone foram controlados mediante a regulação das frequências do ventilador principal e auxiliar. Seleccionaram-se diversas alternativas, que permitiram obter diferentes valores de fluxo quer à entrada do ciclone, quer de recirculação (Tabela 10).

A Figura 38 relaciona a frequência entre o ventilador principal e o caudal mássico à entrada do ciclone.

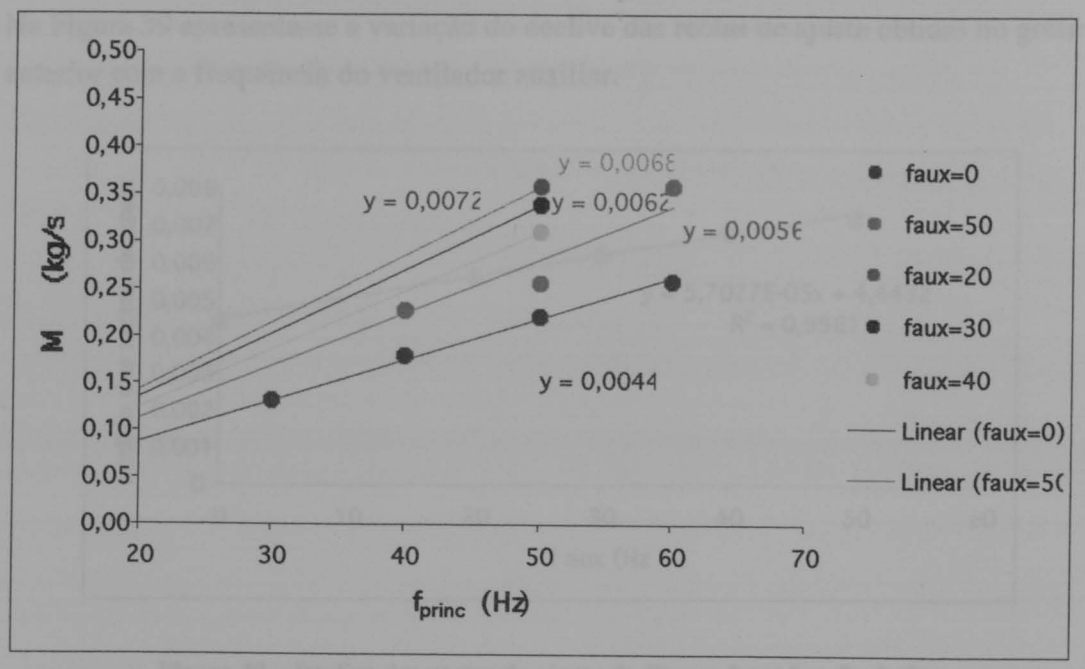


Figura 38 – Caudal mássico de gás *versus* frequência do ventilador principal

Com o intuído de obter uma correlação entre os valores de frequência dos ventiladores e o caudal de entrada no ciclone, efectuou-se um ajuste linear dos pontos experimentais obrigando as rectas a passar na origem ($f_{prin} = 0 \Rightarrow M_{cicl} = 0$). No caso em que existiam vários pontos experimentais para a mesma frequência do ventilador auxiliar, os coeficientes de correlação (r^2) obtidos foram de 0,997 e 0,886, para $f_{aux} = 0$ e $f_{aux} = 50$, respectivamente. No segundo caso obteve-se um pior ajuste, pois por observação do gráfico verifica-se que os pontos não se encontram alinhados, estes resultados podem dever-se a erros experimentais, que são acentuados pelo facto de existirem poucos pontos experimentais.

BIBLIOTECA F.E. PORTO

Na Figura 39 apresenta-se a variação do declive das rectas de ajuste obtidas no gráfico anterior com a frequência do ventilador auxiliar.

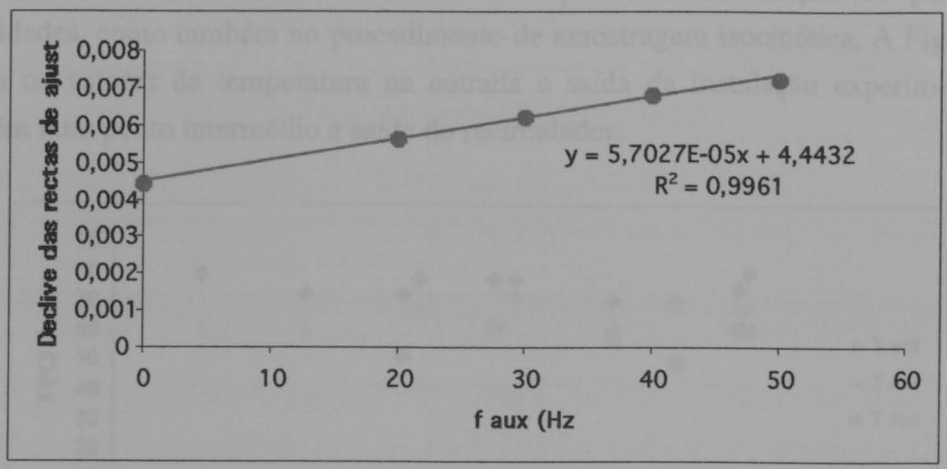


Figura 39 – Declive das rectas de ajuste da Figura 2 em função da f_{aux}

Observando-se o alinhamento dos pontos admite-se que um ajuste linear representa bem a realidade. Tal facto é confirmado por um valor de coeficiente de correlação elevado, próximo de 1 (r^2=0,9961). Sendo assim, foi possível obter uma relação directa entre a frequência do ventilador auxiliar e o caudal mássico de gás à entrada do ciclone.

Para as diferentes combinações de frequências utilizadas apresentam-se na Tabela 10 os valores do caudal mássico correspondente.

Tabela 10 – Relação entre as frequências dos ventiladores e o caudal mássico de gás à entrada do ciclone

f_{princ} (Hz)	f_{aux} (Hz)	M_{cicl} (kg/s)
30	0	0,1323
40		0,1785
50		0,2201
60		0,2592
50	20	0,3577
50	30	0,3386
50	40	0,3104
40	50	0,2280
50		0,2560
60		0,3580

Para o caso da relação entre caudais volúmicos e frequências dos ventiladores, os resultados foram similares e por essa razão não se apresentam neste relatório.

5.1.2 Medição da Temperatura

A medição da temperatura foi realizada com o objectivo de utilizar os valores obtidos não só no cálculo da densidade, necessária para a determinação do perfil de velocidades, como também no procedimento de amostragem isocinética. A Figura 40 ilustra os valores de temperatura na entrada e saída da instalação experimental e também num ponto intermédio à saída do recirculador.

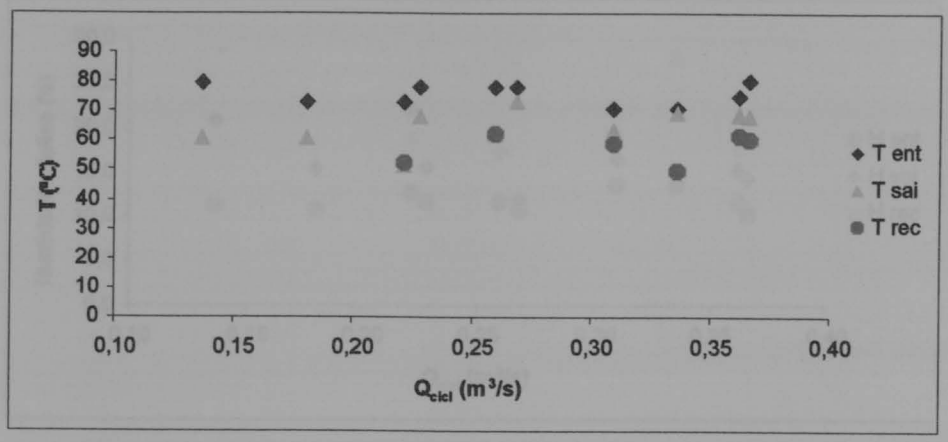


Figura 40 – Temperatura *versus* caudal volumétrico no ciclone

A temperatura de entrada oscila numa gama de valores entre $T_{máx} = 80°C$ e $T_{mín} = 71°C$, dependendo apenas das condições do gás do processo industrial em curso. Relativamente à temperatura de recirculação, observa-se uma $T_{máx} = 62{,}4°C$ e uma $T_{mín} = 49{,}6°C$. A temperatura de saída apresenta uma variação mais relevante, de aproximadamente 22ºC ($T_{máx} = 73{,}3°C$ e $T_{mín} = 51{,}6°C$).

O maior arrefecimento do gás verifica-se no caso em que se realiza a recirculação com $f_{prin} = 40$ e $f_{acc} = 50$, em que a diferença entre as temperatura de entrada e saída se cifra em 21ºC.

A Tabela 11 apresenta a média e o desvio padrão das temperaturas à entrada, saída e no ponto intermédio.

Tabela 11 – Média e desvio padrão das T_{ent}, T_{sai} e T_{rec}

	T_{ent}	T_{rec}	$T_{saí}$
$\bar{x}$ (ºC)	75,9	58,2	64,4
σ (ºC)	3,61	5,15	5,95

5.1.3 Medição da Humidade

A medição da humidade efectua-se com o objectivo de posteriormente calcular a densidade do ar necessária para a determinação da velocidade.

A Figura 41 apresenta os valores experimentais de humidade relativa do ar nas tubagens à entrada, saída e num ponto à saìda do recirculador.

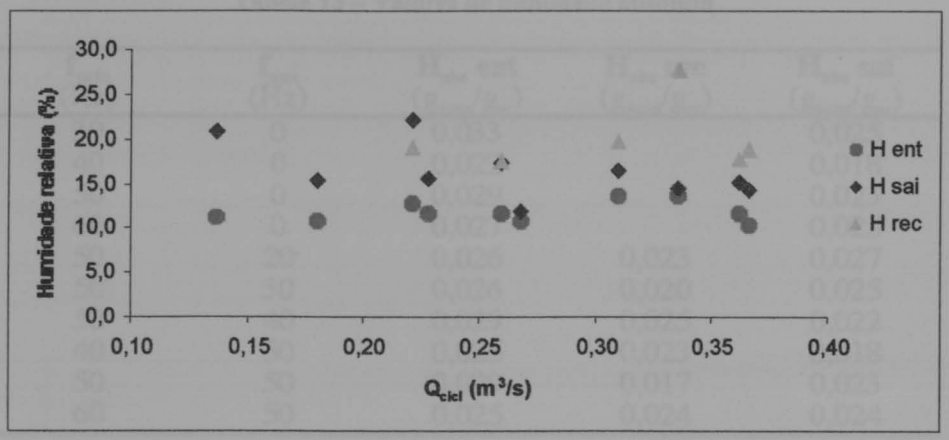


Figura 41 – Humidade *versus* caudal volumétrico no ciclone

Apesar do ar que entra no sistema em estudo ser procedente do secador, encontram-se valores de humidade relativamente elevados. Este facto deve-se às especificações do processo de produção de ácido sulfanilíco.

A Tabela 12 apresenta a média e o desvio padrão das humidades relativas à entrada, saída e no ponto intermédio.

Tabela 12 – Média e desvio padrão das H_{ent}, H_{sai} e H_{rec}

	H_{ent}	H_{rec}	$H_{saí}$
$\bar{x}$ (%)	11,7	19,8	16,4
σ (%)	1,08	3,66	2,94

A humidade á entrada varia entre os valores de $H_{máx} = 13{,}5\%$ e $H_{mín} = 10{,}2\%$, apresentando pequenas oscilações em torno do valor médio de 11,7%.

A humidade medida no ponto à saída do sistema de recirculação apresenta uma maior variação relativamente ao valor médio de 19,8%, sendo as humidades máxima e mínima de 27,8% e 17,5%, respectivamente. Estes valores são substancialmente superiores aos demais, devido às temperaturas de recirculação observadas serem mais baixas.

Relativamente à humidade à saída do sistema verifica-se que os valores mínimo e máximo divergem em 46,1%, cifrando-se o mais alto em 22,1% e o mais baixo em 11,9%.

A Tabela 13 apresenta a humidade absoluta para o ar das condutas, à entrada e saída do sistema e à saída do recirculador.

Tabela 13 – Valores de humidade absoluta

f_{prin} (Hz)	f_{aux} (Hz)	H_{abs} ent ($g_{água}/g_{ar}$)	H_{abs} rec ($g_{água}/g_{ar}$)	H_{abs} saí ($g_{água}/g_{ar}$)
30	0	0,033		0,025
40	0	0,022		0,018
50	0	0,029		0,023
60	0	0,027		0,025
50	20	0,026	0,023	0,027
50	30	0,026	0,020	0,025
50	40	0,029	0,025	0,022
40	50	0,025	0,023	0,018
50	50	0,029	0,017	0,023
60	50	0,025	0,024	0,024

A Tabela 14 apresenta a média e o desvio padrão das humidades absolutas à entrada, saída e no ponto intermédio.

Tabela 14– Média e desvio padrão das H_{ent}, H_{sai} e H_{rec}

	H_{ent}	H_{rec}	$H_{saí}$
$\bar{x}$ (%)	0,027	0,022	0,023
σ (%)	0,0030	0,0030	0,0030

O conhecimento destes valores é fundamental para a determinação do caudal a impôr ao amostrador isocinético nas recolha de dados relativos às eficiências. A conversão de humidades relativas a absolutas é necessária, uma vez que o aparelho considera caudais de ar seco (após passagem num tubo contendo silicagel) enquanto que os caudais calculados aquando da determinação das velocidades do ar contém vapor de água. De notar, que se a conversão não for efectuada, os erros acrescentados, expressos em termos de eficiência isocinética, não são relevantes pois os valores de humidade são baixos.

5.1.4 Medição das Quedas de Pressão

A medição da queda de pressão reveste-se de especial interesse devido aos gastos energéticos impostos nos ventiladores aumentarem substancialmente com o aumento

do ΔP. A queda de pressão nos ciclones depende essencialmente das características do ciclone (e.g. geometria, dimensionamento), do fluído de circulação no sistema e dos caudais volúmicos do processo.

Para o RS_VHE verificam -se que os valores de queda de pressão se apresentam na gama de valores normais para estes aparelhos, sendo ligeiramente inferiores para valores altos de caudal volúmico [1].

5.1.4.1 Sistema sem Recirculação

A Figura 42 apresenta a queda de pressão no ciclone e no recirculador em função do caudal volúmico no ciclone.

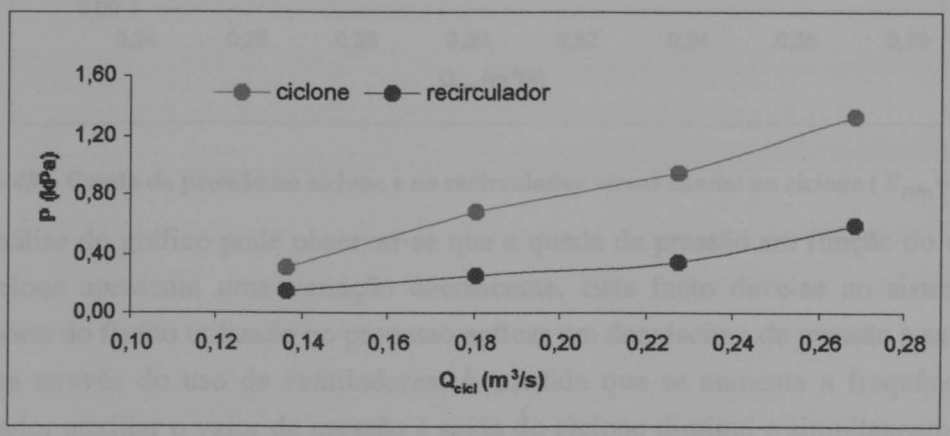


Figura 42 – Queda de pressão no ciclone e no recirculador *versus* caudal no ciclone (sem recirculação)

Uma vez que o caudal é controlado pela frequência do ventilador, verifica-se que à medida que a frequência aumenta, e consequentemente o caudal no ciclone, a queda de pressão sofre uma elevação. Este facto deve-se ao aumento da quantidade de gás a circular no interior da unidade processual que origina maiores perdas de energia por atrito do fluído com as paredes do RS_VHE.

Por análise da Figura 42, verifica-se que a queda de pressão no recirculador não é muito sensível a variações de caudal. Esta situação observa-se devido às características geométricas e dimensionais do recirculador.

O valor de ΔP no ciclone oscila entre o mínimo de 0,31kPa e o máximo de 1,32kPa. Estes valores são praticáveis para sistemas industriais de remoção de partículas finas uma vez que não conduzem a encargos energéticos elevados.

5.1.4.2 Sistema com Recirculação

Frequência do Ventilador Principal de 50Hz

A Figura 43 apresenta a queda de pressão no ciclone e no recirculador em função do caudal volúmico no ciclone para uma frequência do ventilador principal de 50Hz.

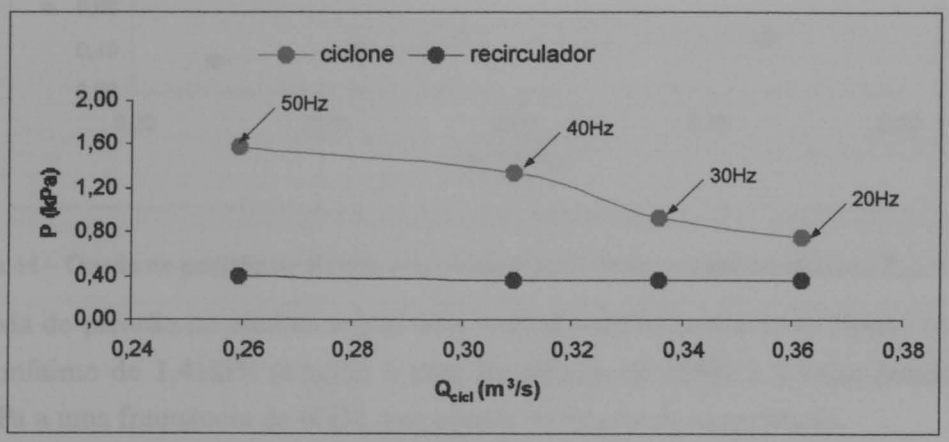


Figura 43 – Queda de pressão no ciclone e no recirculador *versus* caudal no ciclone (F_{prin} = 50Hz)

Por análise do gráfico pode observar-se que a queda de pressão em função do caudal no ciclone apresenta uma variação decrescente. Este facto deve-se ao sistema de transporte do fluído utilizado no processo aplicar um decréscimo de pressão à saída do sistema através do uso de ventiladores. À medida que se aumenta a frequência do ventilador auxiliar o valor de pressão à saída do ciclone diminui e simultaneamente a pressão à entrada do ciclone aumenta, aumentando portanto a queda de pressão no ciclone. Uma vez que a pressão imposta à saída do ciclone e em consequência à saída do recirculador é menor, o ventilador principal não funciona tão eficazmente, isto é, o caudal sugado é inferior. Como resultado tem-se uma redução do caudal à entrada do ciclone.

A queda de pressão no recirculador parece não apresentar uma variação significativa. Esta tendência é observada em todas as determinações experimentais.

Frequência do Ventilador Auxiliar de 50Hz

A Figura 44 mostra a variação do ΔP no ciclone e no recirculador em função do Q_{cicl} no caso da frequência de laboração do ventilador auxiliar ser 50Hz.

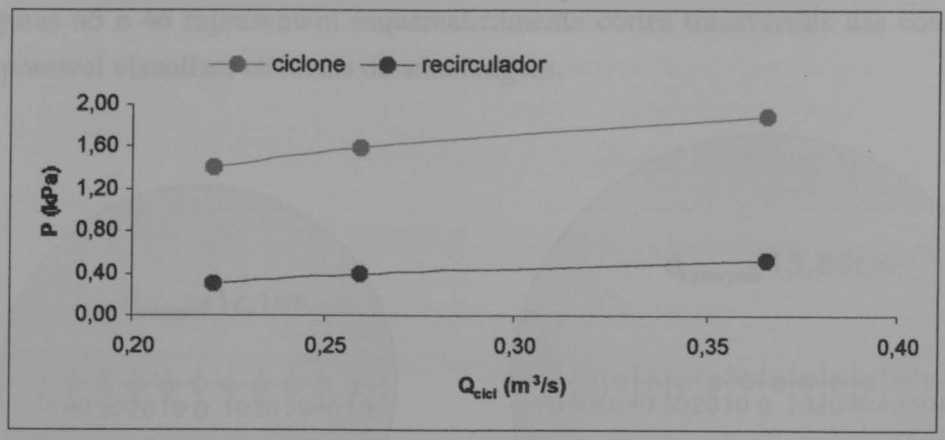


Figura 44 – Queda de pressão no ciclone e no recirculador *versus* caudal no ciclone (F_{aux} = 50Hz)

A queda de pressão no ciclone segue uma variação aproximadamente linear, sendo o valor mínimo de 1,41kPa atingido a uma frequência de 40Hz e o valor máximo de 1,81kPa a uma frequência de 60Hz, nos pontos extremos da experiência.

5.1.5 Determinação do Perfil de Velocidades à Entrada e Saìda do Sistema e à Saída do Recirculador

Este passo insere-se numa sequência de etapas que permitirão a realização da amostragem isocinética, e consequentemente, o cálculo das eficiências globais e fraccionais do ciclone RS_VHE.

Esta parte do trabalho tem por objectivo a caracterização do perfil de velocidades ao longo da secção transversal da conduta, em três pontos determinantes para a caracterização do regime de transporte do gás. Os pontos localizam-se à entrada e à saída quer do recirculador, quer do sistema em estudo (Ver Secção 4.1) e são os mesmos utilizados para a recolha de dados isocinéticos.

As Figuras 45 e 46 representam esquematicamente cortes transversais das condutas, sendo possível visualizar os locais de amostragem.

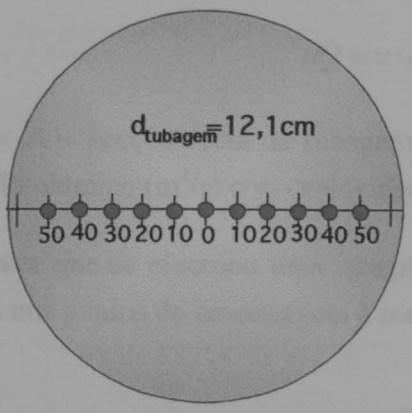


Figura 45 – Corte transversal da tubagem e pontos de amostragem de velocidade à entrada e à saída do sistema

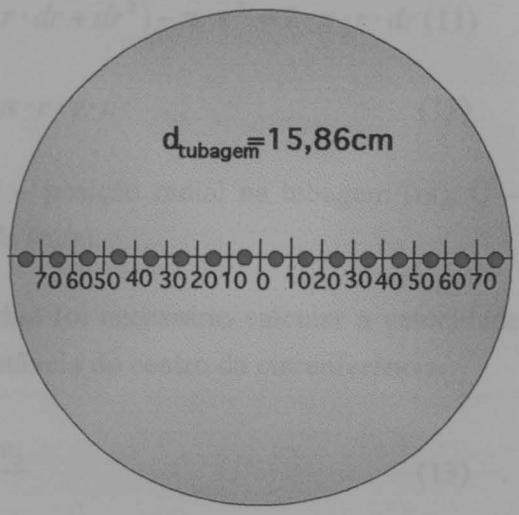


Figura 46 – Corte transversal da tubagem e pontos de amostragem de velocidade à saída do recirculador

Determinou-se também o perfil de velocidade na tubagem da chaminé do processo a decorrer na QUIMIGAL, com o intuído de comparar as performances do ciclone RS_VHE e da unidade processual de limpeza do efluente gasoso instalada (filtro de mangas).

As velocidades foram calculadas recorrendo à seguinte fórmula:

$$v = \frac{\sqrt{1000 \cdot \Delta P_{din}}}{\rho} \qquad (10)$$

Sendo: ΔP_{din} – queda de pressão dinâmica (Pa) e ρ – massa volúmica (kg/m^3).

Para a determinação da queda de pressão dinâmica foi utilizado um tubo de Pitot *standard*. O cálculo da densidade envolveu a determinação da temperatura, humidade e pressão estática. A recolha dos dados foi efectuada mediante um instrumento portátil de medida – TESTO.

A velocidade média do fluído foi obtida por integração dos valores pontuais de velocidade, apresentando-se de seguida a dedução da equação.

A secção recta infinitesimal da tubagem e o caudal volúmico infinitesimal são dados pelas equações 11 e 12, respectivamente.

$$dA = \pi \cdot (r + dr)^2 - \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (r^2 + 2 \cdot r \cdot dr + dr^2) - \pi \cdot r^2 = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \quad (11)$$

$$dQ = v \cdot dA = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot v \cdot dr \quad (12)$$

Sendo: A – secção recta da tubagem (m^2), r – posição radial na tubagem (m), Q – caudal volúmico (m^3/s) e v – velocidade do gás (m/s).

Uma vez que se efectuou uma integração radial foi necessário calcular a velocidade média nos pontos de amostragem à mesma distância do centro da circunferência.

$$\bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (13)$$

Sendo: $\bar{v}$ - média aritmética da velocidade entre dois pontos de amostragem, v_1 e v_2, simétricos em relação ao centro.

A velocidade média do gás na conduta foi calculada a partir da equação 14, apresentada aqui sob a forma de um integral.

$$v_m = \frac{Q}{A} = \frac{\int dQ}{A} = \int_0^R \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \bar{v} \cdot dr}{\pi \cdot R^2} = \frac{2}{R^2} \cdot \int_0^R \bar{v} \cdot r \cdot dr \quad (14)$$

Sendo: v_m – velocidade média do gás na conduta e R – raio da conduta (m).

Esta Secção do relatório foi subdividida em três partes fundamentais para uma melhor compreensão da informação experimental colectada (Ver Anexo C). A primeira refere-se ao sistema a laborar sem recirculação, ou seja, com o ventilador auxiliar desligado, fazendo-se variar o ventilador principal desde 30 até 60Hz, com um passo de 10Hz. Na segunda manteve-se o ventilador principal a funcionar a 50Hz, tendo o ventilador auxiliar trabalhado às frequências de 20, 30 e 40Hz. Por último, foi mantida constante a frequência do ventilador auxiliar, a 50Hz, e variou-se a do ventilador principal entre 40 e 60Hz.

5.1.5.1 Sistema sem Recirculação

As Figuras 47 a 54 apresentam os perfis de velocidade para as experiências realizadas na instalação piloto.

As Tabelas 15 a 18 mostram os valores de velocidade média, caudal volúmico e mássico para as referidas experiências.

BIBLIOTECA F.E. PORTO

- Frequência do Ventilador Principal de 30Hz

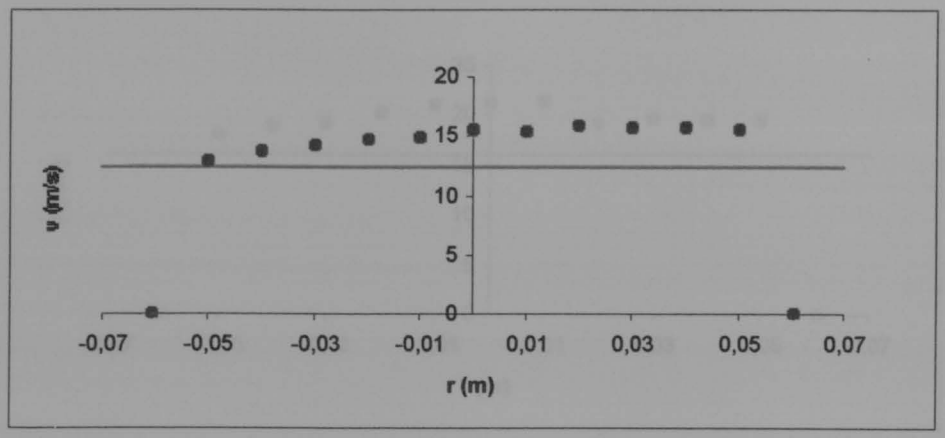


Figura 47 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=30Hz, f_{aux}=0Hz)

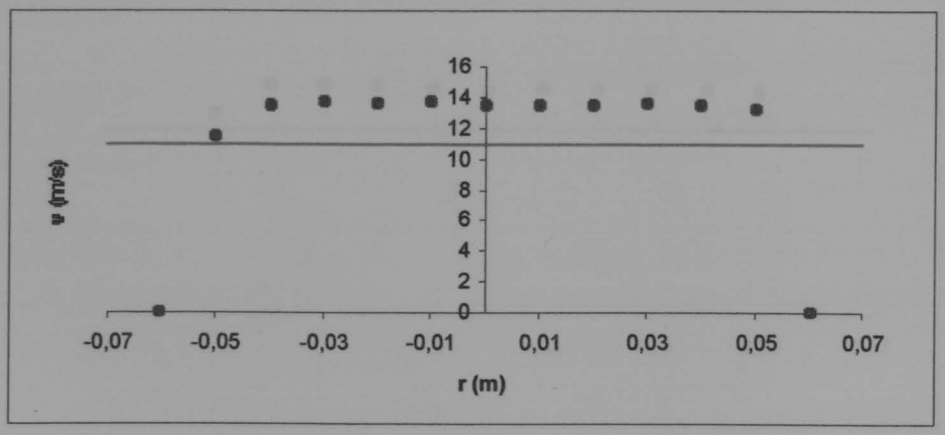


Figura 48 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=30Hz, f_{aux}=0Hz)

Tabela 15 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=30Hz, f_{aux}=0Hz)

	Entrada	Saída
$v_{méd}$ (m/s)	12,15	10,86
$Q_{méd}$ (m^3/hr)	503,1	449,7
$M_{méd}$ (kg/s)	0,1355	0,1290

- Frequência do Ventilador Principal de 40Hz

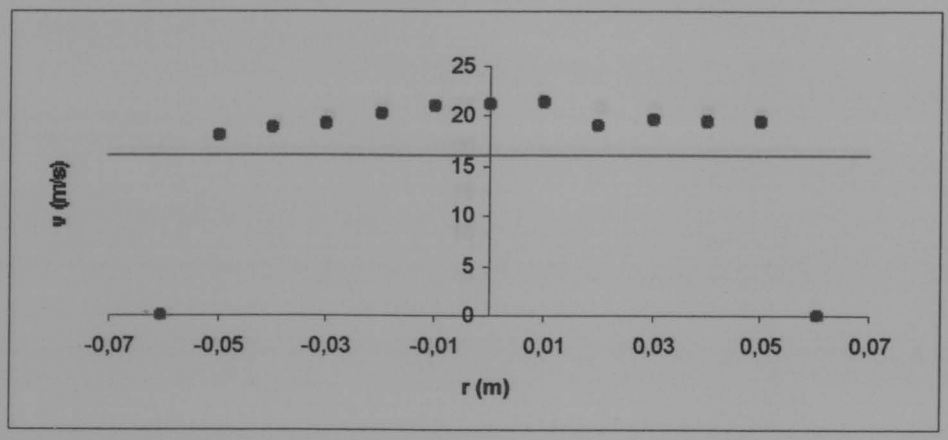


Figura 49 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=0Hz)

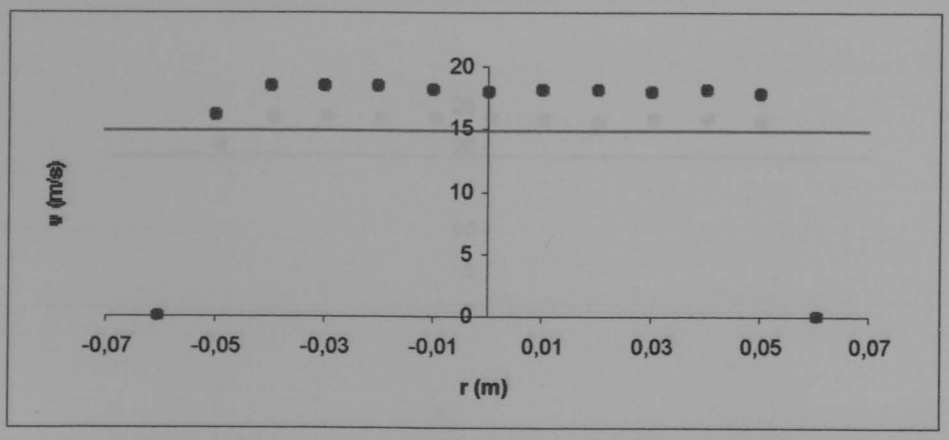


Figura 50 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=0Hz)

Tabela 16 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=0Hz)

	Entrada	Saída
$v_{méd}$ (m/s)	15,97	14,71
$Q_{méd}$ (m^3/hr)	661,0	608,8
$M_{méd}$ (kg/s)	0,1817	0,1753

- Frequência do Ventilador Principal de 50Hz

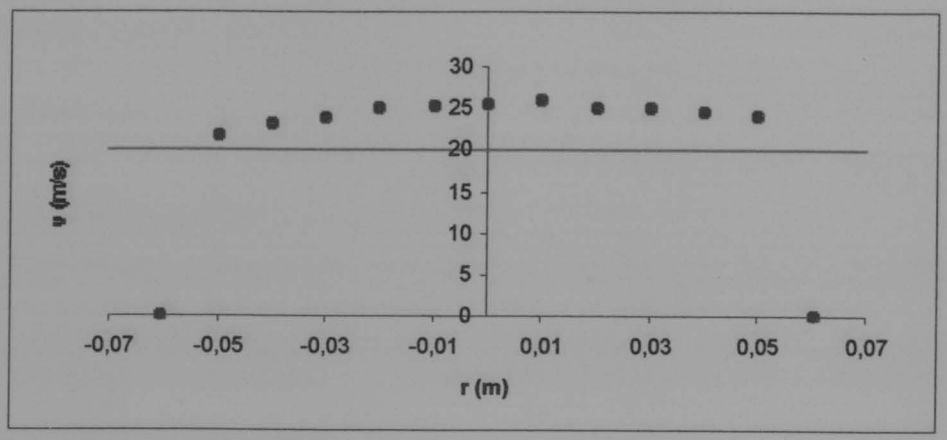


Figura 51 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=0Hz)

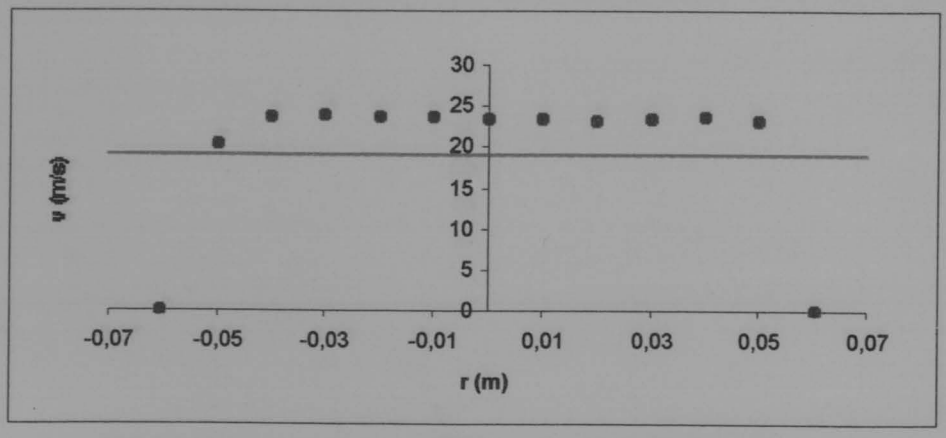


Figura 52 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=0Hz)

Tabela 17 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=0Hz)

	Entrada	Saída
$v_{méd}$ (m/s)	19,77	18,99
$Q_{méd}$ (m^3/hr)	818,3	786,0
$M_{méd}$ (kg/s)	0,2199	0,2203

- Frequência do Ventilador Principal de 60Hz

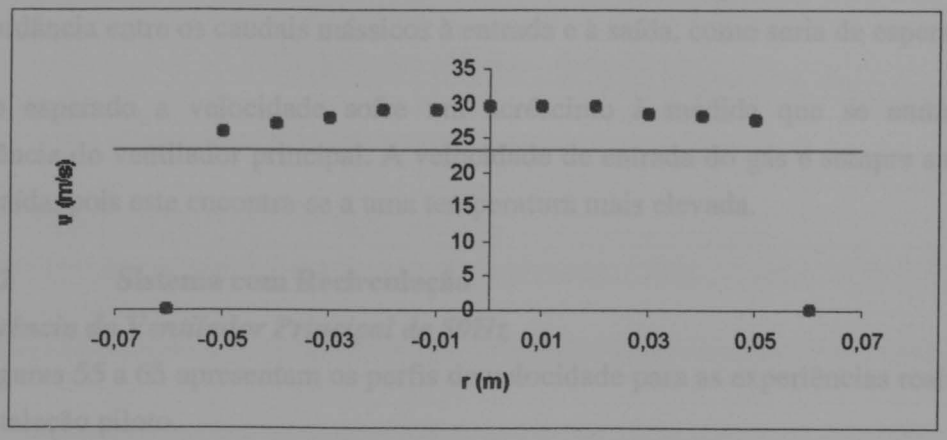


Figura 53 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=0Hz)

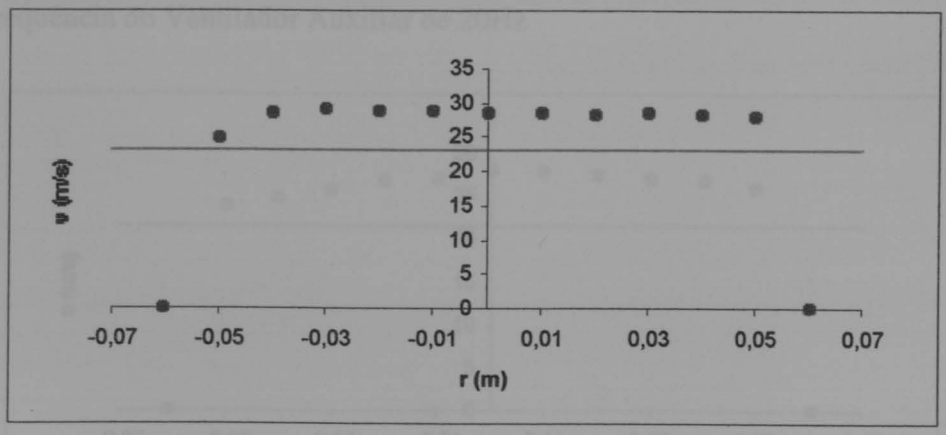


Figura 54 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=0Hz)

Tabela 18 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=0Hz)

	Entrada	Saída
$v_{méd}$ (m/s)	22,91	22,99
$Q_{méd}$ (m^3/hr)	948,5	951,7
$M_{méd}$ (kg/s)	0,2545	0,2639

Por observação dos gráficos anteriores, verifica-se que a tendência dos perfis é similar, apresentando um patamar de velocidade. Os valores experimentais denotam uma fraca oscilação em torno do valor médio da velocidade do patamar, sendo então

possível considerar como turbulento o regime de fluxo. A velocidade média do gás na conduta é aproximadamente 4/5 da velocidade média do patamar. Há ainda boa concordância entre os caudais mássicos à entrada e à saída, como seria de esperar.

Como esperado a velocidade sofre um acréscimo à medida que se aumenta a frequência do ventilador principal. A velocidade de entrada do gás é sempre superior à de saída, pois este encontra-se a uma temperatura mais elevada.

5.1.5.2 Sistema com Recirculação

Frequência do Ventilador Principal de 50Hz

As Figuras 55 a 63 apresentam os perfis de velocidade para as experiências realizadas na instalação piloto.

As Tabelas 19 a 21 mostram os valores de velocidade média, caudal volúmico e mássico para as referidas experiências.

- Frequência do Ventilador Auxiliar de 20Hz

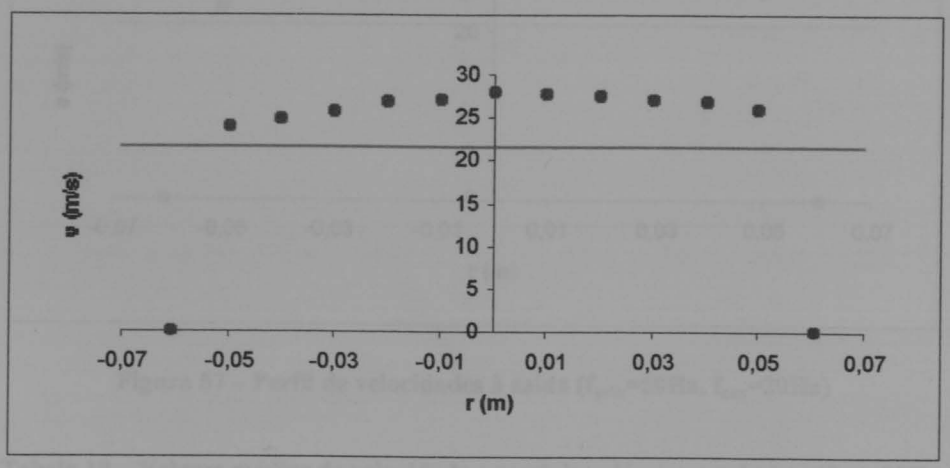


Figura 55 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=20Hz)

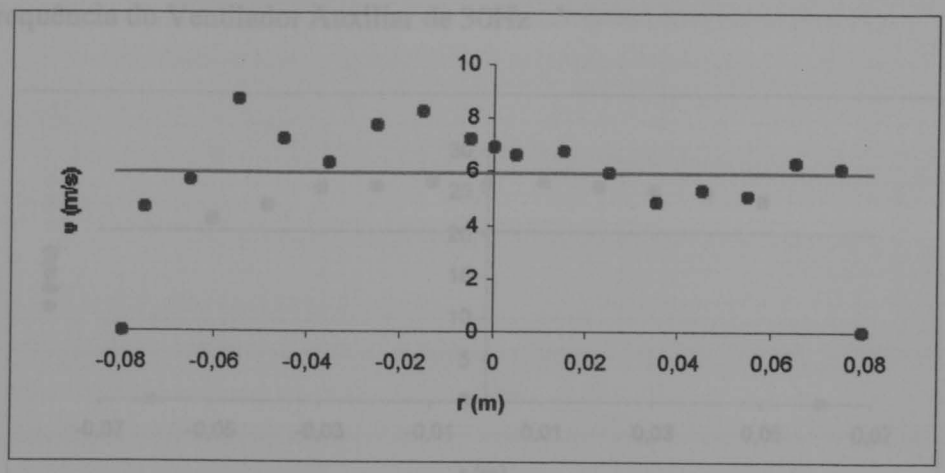


Figura 56 – Perfil de velocidades à saída do recirculador (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=20Hz)

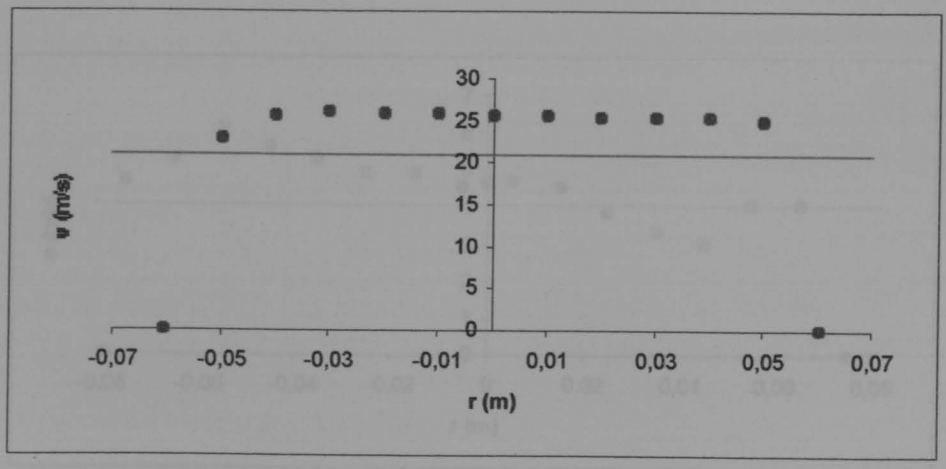


Figura 57 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=20Hz)

Tabela 19 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=20Hz)

	Entrada	Recirculação	Saída
$v_{méd}$ (m/s)	21,41	5,87	20,67
$Q_{méd}$ (m^3/hr)	886,4	417,7	855,8
$M_{méd}$ (kg/s)	0,2409	0,1172	0,2403

- Frequência do Ventilador Auxiliar de 30Hz

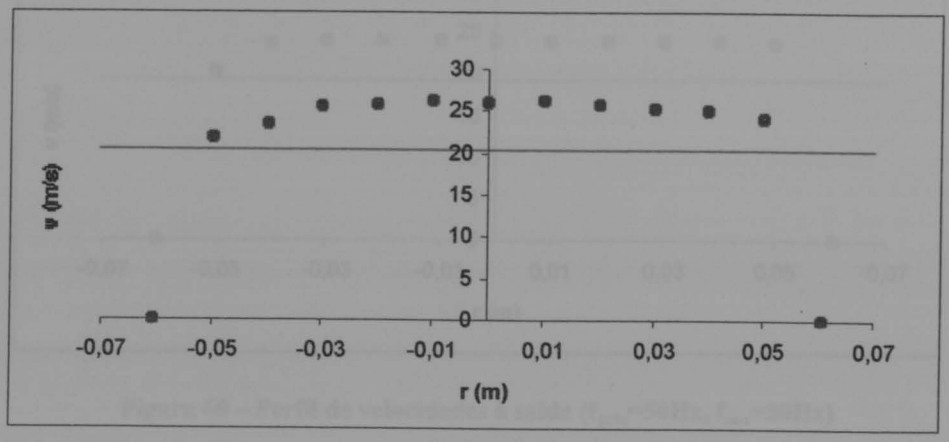


Figura 58 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=30Hz)

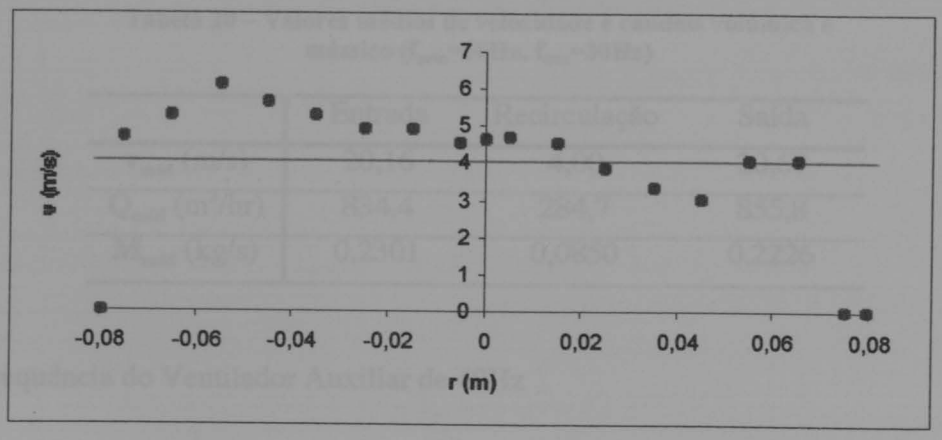


Figura 59 – Perfil de velocidades à saída do recirculador (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=30Hz)

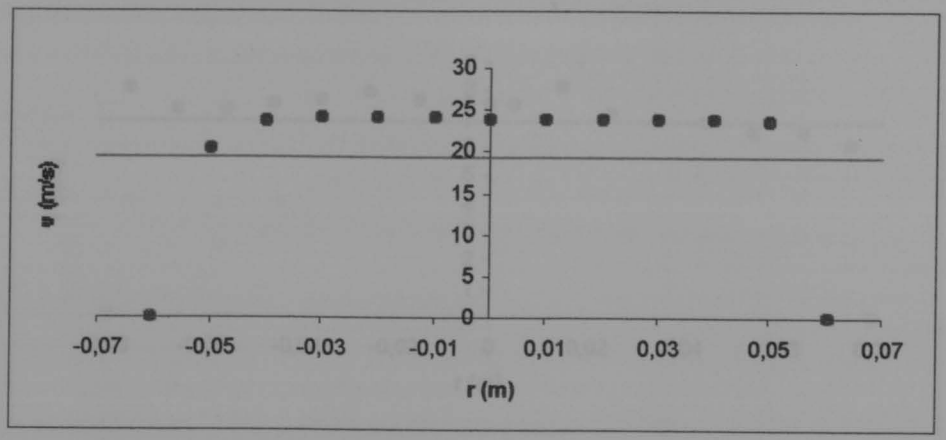


Figura 60 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=30Hz)

Tabela 20 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=30Hz)

	Entrada	Recirculação	Saída
$v_{méd}$ (m/s)	20,16	4,00	20,67
$Q_{méd}$ (m^3/hr)	834,4	284,7	855,8
$M_{méd}$ (kg/s)	0,2301	0,0850	0,2226

- Frequência do Ventilador Auxiliar de 40Hz

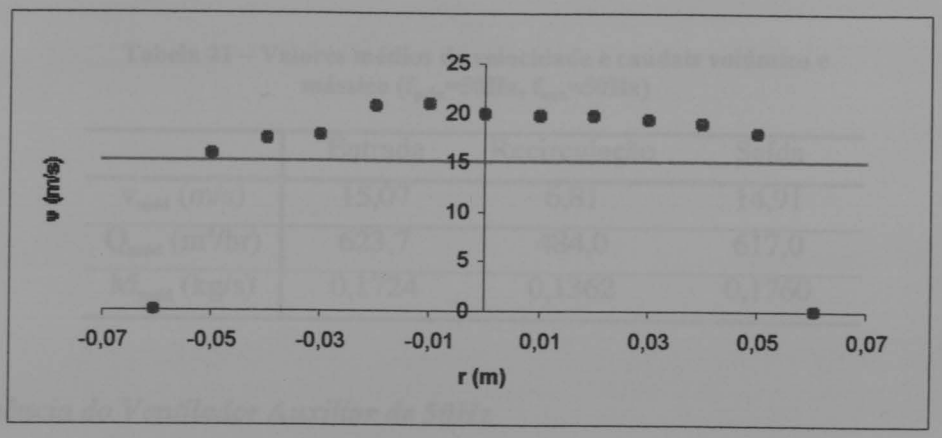


Figura 61 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=40Hz)

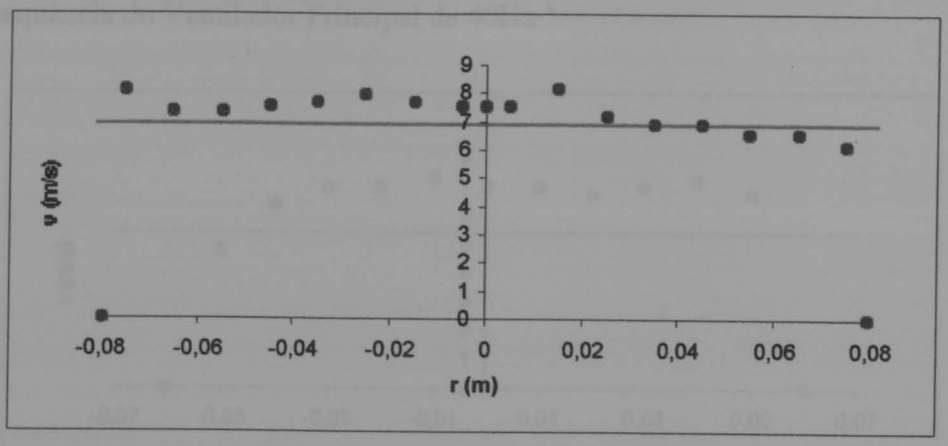


Figura 62 – Perfil de velocidades à saída do recirculador (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=40Hz)

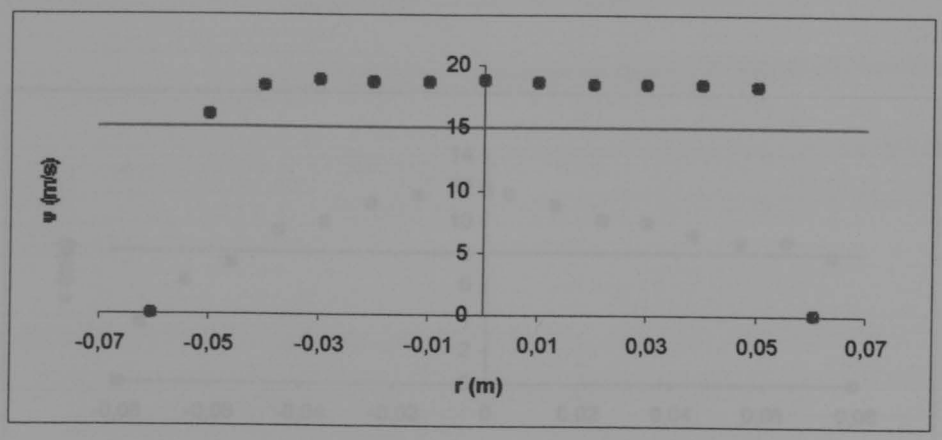


Figura 63 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=50Hz)

Tabela 21 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=50Hz)

	Entrada	Recirculação	Saída
$v_{méd}$ (m/s)	15,07	6,81	14,91
$Q_{méd}$ (m^3/hr)	623,7	484,0	617,0
$M_{méd}$ (kg/s)	0,1724	0,1362	0,1760

Frequência do Ventilador Auxiliar de 50Hz

As Figuras 64 a 72 apresentam os perfis de velocidade para as experiências realizados na instalação piloto.

As Tabelas 22 a 24 mostram os valores de velocidade média, caudal volúmico e mássico para as referidas experiências.

- Frequência do Ventilador Principal de 40Hz

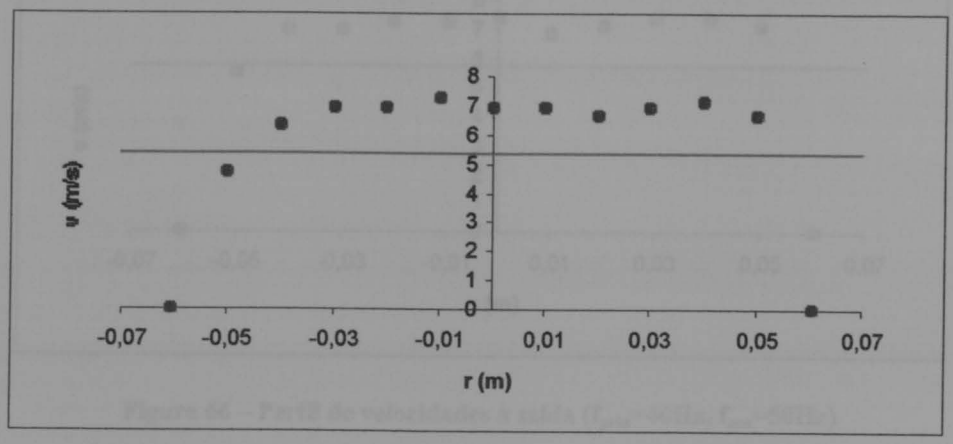


Figura 64 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=50Hz)

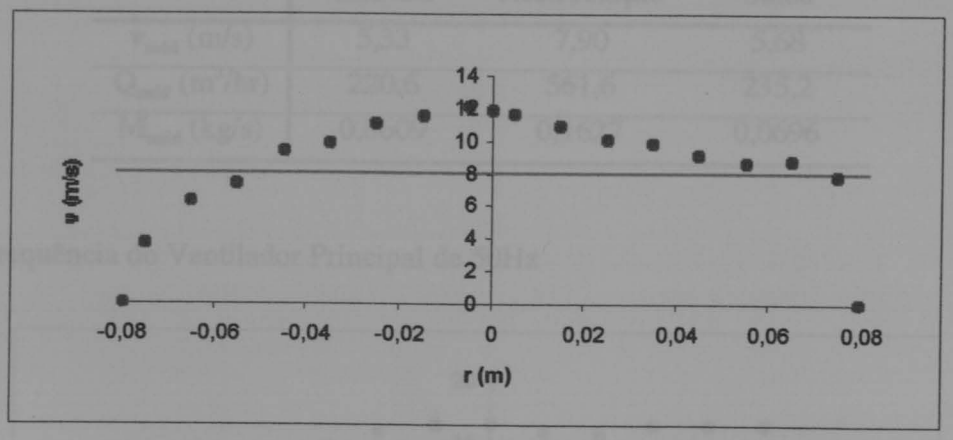


Figura 65 – Perfil de velocidades à saída do recirculador (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=50Hz)

BIBLIOTECA F.E. PORTO

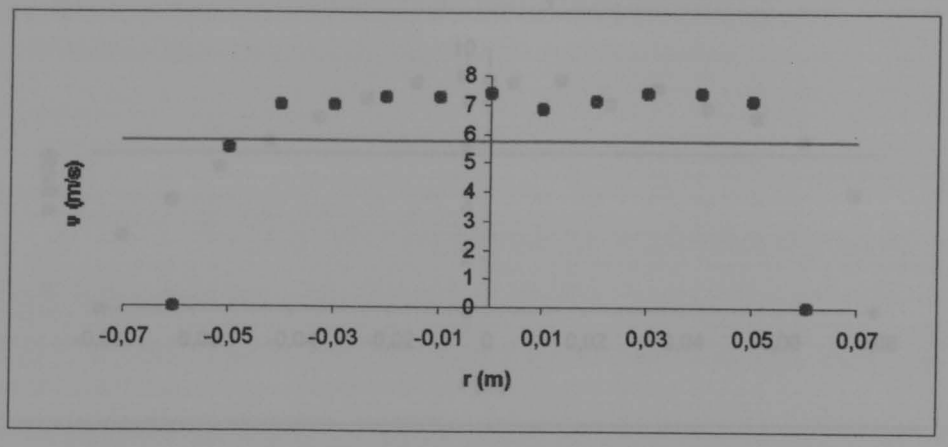


Figura 66 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=50Hz)

Tabela 22 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=50Hz)

	Entrada	Recirculação	Saída
$v_{méd}$ (m/s)	5,33	7,90	5,68
$Q_{méd}$ (m^3/hr)	220,6	561,6	235,2
$M_{méd}$ (kg/s)	0,0609	0,1627	0,0696

- Frequência do Ventilador Principal de 50Hz

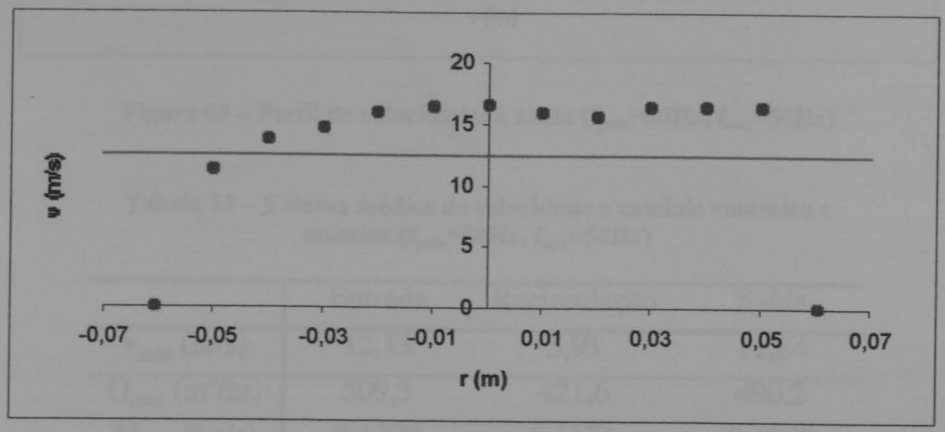


Figura 67 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=50Hz)

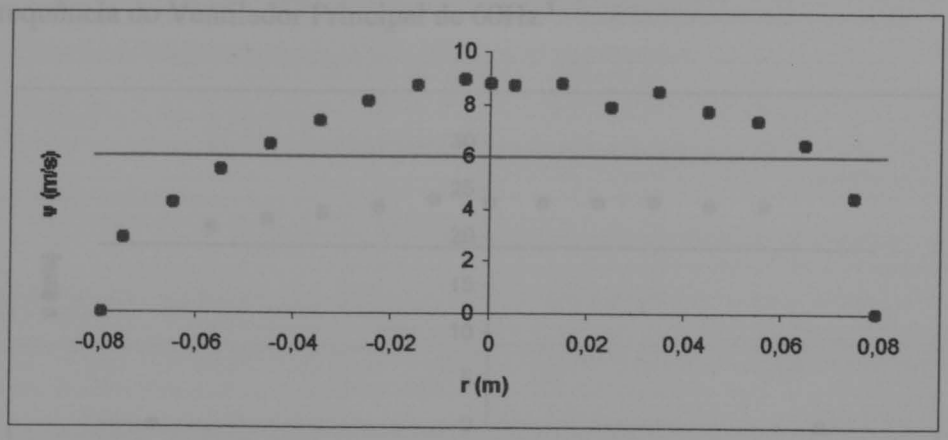


Figura 68 – Perfil de velocidades à saída do recirculador (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=50Hz)

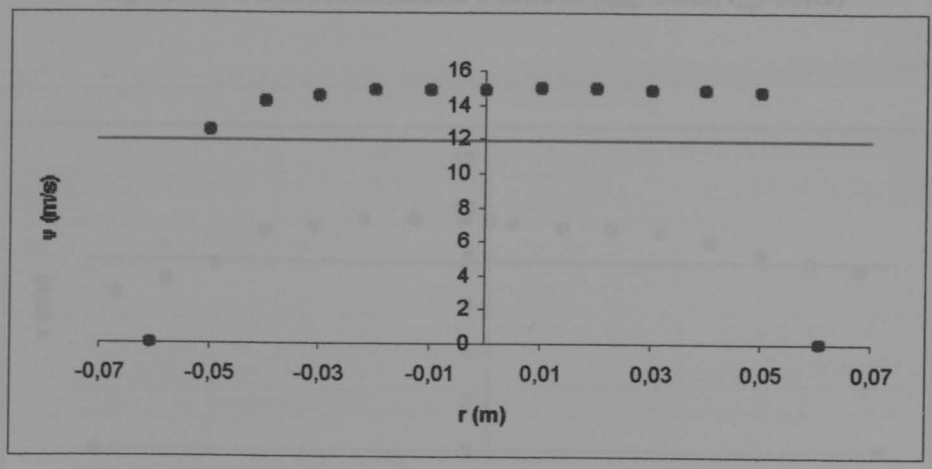


Figura 69 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=50Hz)

Tabela 23 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=50Hz)

	Entrada	Recirculação	Saída
$v_{méd}$ (m/s)	12,13	5,93	11,84
$Q_{méd}$ (m^3/hr)	509,3	421,6	490,2
$M_{méd}$ (kg/s)	0,1378	0,1171	0,1399

- Frequência do Ventilador Principal de 60Hz

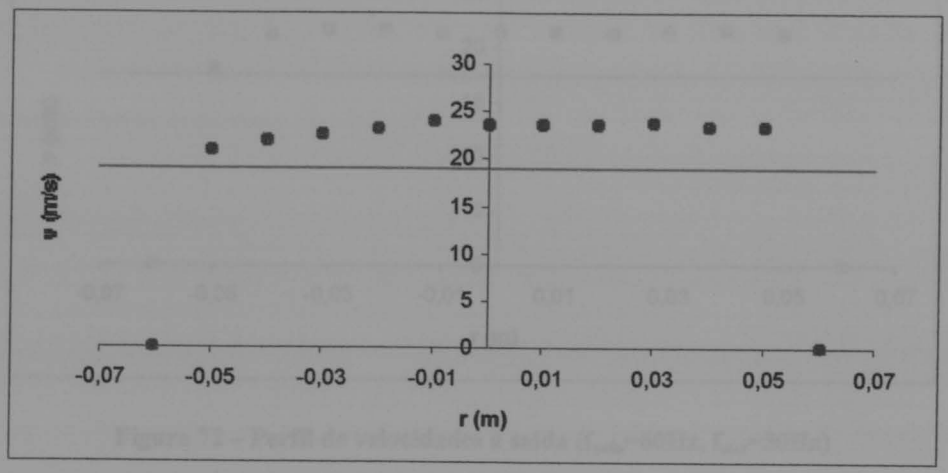


Figura 70 – Perfil de velocidades à entrada (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=50Hz)

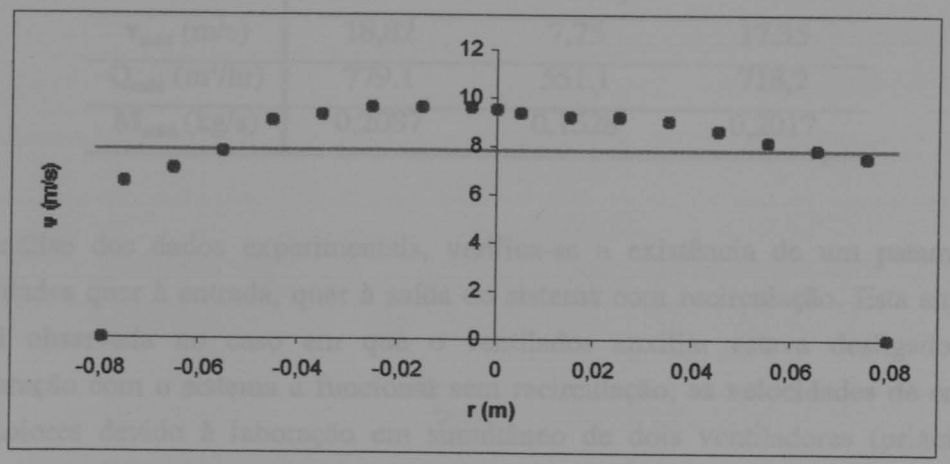


Figura 71 – Perfil de velocidades à saída do recirculador (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=50Hz)

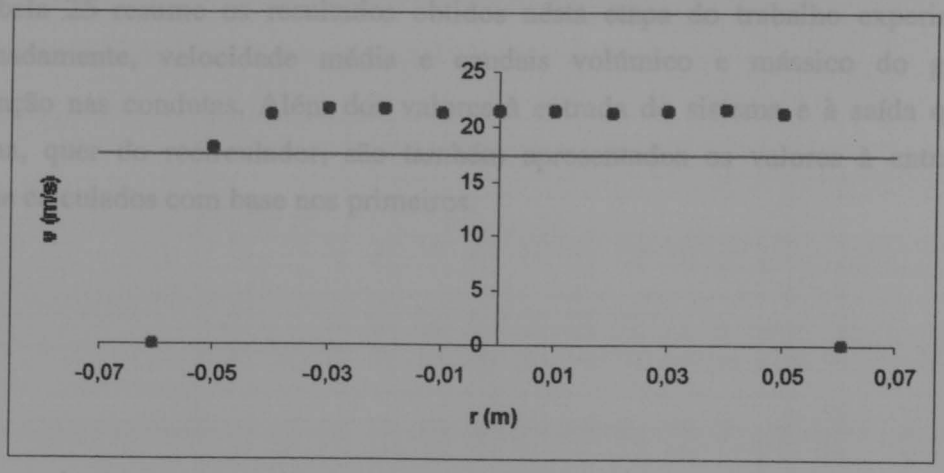


Figura 72 – Perfil de velocidades à saída (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=50Hz)

Tabela 24 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=50Hz)

	Entrada	Recirculação	Saída
$v_{méd}$ (m/s)	18,82	7,75	17,35
$Q_{méd}$ (m^3/hr)	779,1	551,1	718,2
$M_{méd}$ (kg/s)	0,2087	0,1528	0,2017

Por análise dos dados experimentais, verifica-se a existência de um patamar de velocidades quer à entrada, quer à saída do sistema com recirculação. Esta situação era já observada no caso em que o ventilador auxiliar estava desligado. Em comparação com o sistema a funcionar sem recirculação, as velocidades de entrada são maiores devido à laboração em simultâneo de dois ventiladores (principal e auxiliar) que fazem aumentar a sucção do fluído do processo em curso na instalação industrial. De novo, há uma boa concordância entre os caudais mássicos à entrada e à saída do sistema.

Por sua vez, os perfis do gás à saída do recirculador, já não apresentam uma constância nos valores de velocidade, devendo-se este facto à proximidade do ventilador auxiliar do ponto de amostragem. O regime de transporte do fluído nesta situação é mais turbulento, não sendo portanto possível considerar uma homogeneidade nos valores de velocidade. Por observação das curvas de velocidade não é possível inferir um padrão para o deslocamento do gás, isto é, a turbulência não apresenta uma curva característica. Os valores obtidos à saída do recirculador estão sujeitos a um maior erro experimental, uma vez que devido ao diâmetro da tubagem ser superior as velocidades observadas são menores em termos absolutos.

A Tabela 25 resume os resultados obtidos nesta etapa do trabalho experimental, designadamente, velocidade média e caudais volúmico e mássico do gás em circulação nas condutas. Além dos valores à entrada do sistema e à saída quer do sistema, quer do recirculador, são também apresentados os valores à entrada do ciclone calculados com base nos primeiros.

Tabela 25 – Velocidade média e caudais volúmico e mássico do gás em todos os ensaios

		Entrada			Recirculação			Saída			Ciclone		
f_{aux} (Hz)	f_{prin} (Hz)	$v_{méd}$ (m/s)	$Q_{méd}$ (m^3/hr)	$M_{méd}$ (kg/s)	$v_{méd}$ (m/s)	$Q_{méd}$ (m^3/hr)	$M_{méd}$ (kg/s)	$v_{méd}$ (m/s)	$Q_{méd}$ (m^3/hr)	$M_{méd}$ (kg/s)	$v_{méd}$ (m/s)	$Q_{méd}$ (m^3/hr)	$M_{méd}$ (kg/s)
0	30	12,15	503,1	0,1355	-	-	-	10,86	449,7	0,1290	9,04	476,4	0,1283
	40	15,97	661,0	0,1817	-	-	-	14,71	608,8	0,1753	12,05	634,9	0,1746
	50	19,77	818,3	0,2199	-	-	-	18,99	786,0	0,2203	15,23	802,2	0,2155
	60	22,91	948,5	0,2545	-	-	-	22,99	951,7	0,2639	18,03	950,1	0,2550
20	50	21,41	886,4	0,2409	5,87	417,7	0,1172	20,67	855,8	0,2403	24,77	1304,8	0,3579
30	50	20,16	834,4	0,2301	4,00	284,7	0,0850	19,20	749,9	0,2226	21,47	1130,9	0,3151
40	50	15,07	623,7	0,1724	6,81	484,0	0,1362	14,91	617,0	0,1760	20,91	1101,3	0,3086
50	40	5,33	220,6	0,0609	7,90	561,6	0,1627	5,68	235,2	0,0696	14,57	767,4	0,2235
	50	12,30	509,3	0,1378	5,93	421,6	0,1171	11,84	490,2	0,1399	17,60	927,0	0,2549
	60	18,82	779,1	0,2087	7,75	551,1	0,1528	17,35	718,2	0,2017	25,49	1342,7	0,3615

Da Tabela 25, retira-se que os valores de velocidade à entrada oscilam entre 5,33 e 22,91m/s, ocorrendo o primeiro caso quando $f_{aux} = 50Hz$ e $f_{prin} = 40Hz$, e o segundo quando $f_{aux} = 0Hz$ e $f_{prin} = 60Hz$. Como é evidente, os caudais vêem-se afectados da mesma forma pela variação de frequência dos ventiladores.

À saída os valores mínimo e máximo ocorrem nas mesmas situações, sendo respectivamente, 5,68 e 22,99m/s.

Na picagem à saída do recirculador os valores de velocidade observados são substancialmente menores, variando entre 4,00m/s ($f_{prin} = 50Hz$, $f_{aux} = 30Hz$) e 7,90m/s ($f_{prin} = 40Hz$, $f_{aux} = 50Hz$).

O cálculo do caudal mássico à entrada do ciclone foi tomado como a média do caudais de entrada e saída do sistema, de forma a atenuar os erros experimentais na recolha da informação. Para a determinação do caudal volúmico foi também considerada a média das densidades do gás nos pontos atrás referidos.

Para o sistema sem recirculação, as velocidades na entrada do ciclone são inferiores aos na entrada do sistema porque o diâmetro da conduta é maior. Estes valores variam entre 9,04 e 18,03m/s, para a frequência do ventilador principal mínima e máxima, respectivamente.

No caso de se efectuar a recirculação de parte do gás, os valores à entrada do ciclone são superiores visto que são fruto da soma dos caudais de entrada e recirculação. Neste caso particular variam numa gama entre 14,57 e 25,49m/s, sendo na primeira situação $f_{prin} = 40Hz$ e $f_{aux} = 50Hz$ e na última $f_{prin} = 60Hz$ e $f_{aux} = 50Hz$.

5.1.6 Determinação do Perfil de Velocidades à saìda da Chaminéda Unidade de Ácido Sulfanílico da QUIMIGAL

A seguir, apresenta-se o perfil de velocidades da chaminé (d=62,2cm) da instalação de produção de ácido sulfanílico da QUIMIGAL que se encontra a jusante do filtro de mangas destinado à remoção do pó contido no efluente gasoso do processo (Figura 73).

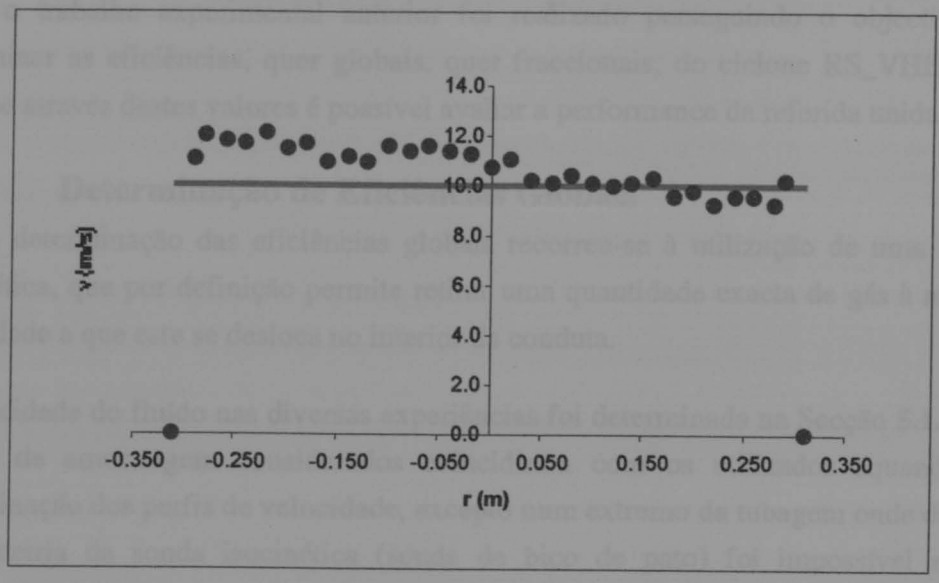


Figura 73 – Perfil de velocidade na chaminé da unidade de ácido sulfanílico da QUIMIGAL

O perfil de velocidades é bastante homogéneo, porém, devido à localização dos pontos de amostragem ser muito próxima da saída do ventilador do processo, apresenta uma assimetria.

A Tabela 26 contém informação relativa à velocidade média do gás na conduta e aos caudais mássico e volúmico.

Tabela 26 – Valores médios de velocidade e caudais volúmico e mássico

	Saída da chaminé
$v_{méd}$ (m/s)	9,95
$Q_{méd}$ (m^3/hr)	10881,5
$M_{méd}$ (kg/s)	3,0668

5.2 Determinação de Eficiências

Esta Secção do trabalho está dividida em duas partes fundamentais. A primeira trata da determinação de eficiências globais, que indicam a quantidade relativa de partículas separadas do gás da conduta. A segunda é dedicada ao estudo das eficiências fraccionais, que se referem à distribuição da eficiência de remoção de acordo com o diâmetro das partículas de ácido sulfanílico.

Todo o trabalho experimental anterior foi realizado perseguindo o objectivo de determinar as eficiências, quer globais, quer fraccionais, do ciclone RS_VHE, uma vez que através destes valores é possível avaliar a performance da referida unidade.

5.2.1 Determinação de Eficiências Globais

Para a determinação das eficiências globais recorreu-se à utilização de uma sonda isocinética, que por definição permite retirar uma quantidade exacta de gás à mesma velocidade a que este se desloca no interior da conduta.

A velocidade do fluído nas diversas experiências foi determinada na Secção **5.1.5**. Os pontos de amostragem considerados coincidiram com os utilizados aquando da determinação dos perfis de velocidade, excepto num extremo da tubagem onde devido à geometria da sonda isocinética (sonda de bico de pato) foi impossível retirar amostras.

As Figuras 74 e 75 apresenta um corte transversal da conduta onde estão assinalados os pontos de amostragem.

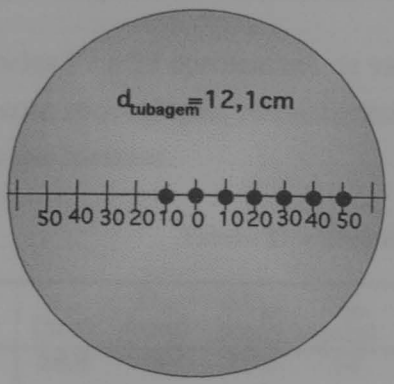


Figura 74 – Corte transversal da tubagem e pontos de amostragem isocinética à entrada e à saída do sistema

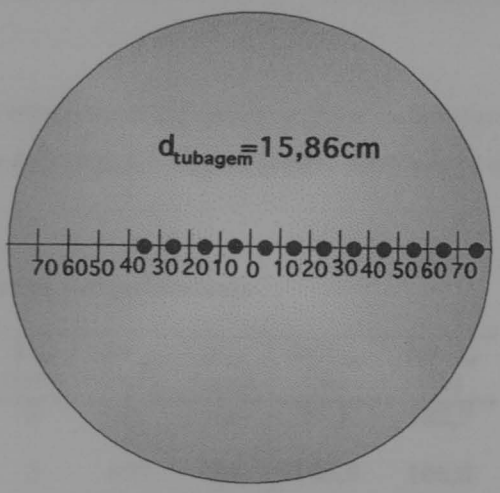


Figura 75 – Corte transversal da tubagem e pontos de amostragem isocinética à saída do recirculador

Devido à homogeneidade observada para os perfis de velocidade, considerou-se a velocidade do gás uniforme e igual à média aferida no patamar do perfil de velocidades. De acordo com as velocidades em questão, foram usados diferentes ponteiras de sonda com diâmetros na gama de 3 a 6mm.

De forma a validar os resultados obtidos foi calculado o isocinetismo recorrendo à seguinte equação:

$$isoc = \frac{Q_{real}}{Q_{esperado}} \quad (15)$$

Por sua vez, os caudais esperado e real foram calculados através das expressões 16 e 17, respectivamente:

$$Q_{real} = \frac{V}{\Delta t} \quad (16)$$

$$Q_{esperado} = v \cdot A_{Nozzle} \quad (17)$$

Sendo: V – volume recolhido pelo amostrador isocinético (m^3); Δt – tempo de amostragem (s); v – velocidade média do gás no patamar do perfil de velocidades (m/s) e A_{Nozzle} – área da ponteira de sonda (m^2). Como o volume de gás medido pelo amostrador está nas condições de base seca, à P_{atm} e a uma $T \neq T_{real}$, é necessário corrigir este valor para as condições na conduta.

A qualidade dos valores experimentais é considerada satisfatória se o isocinetismo se encontrar compreendido entre 90 e 110%.

As Tabelas 27 e 28 apresentam, os valores de eficiências isócinéticas para os sistemas sem e com recirculação, respectivamente, e a informação experimental necessária ao cálculo das mesmas.

Tabela 27 – Eficiência isocinética sem recirculação

f_{princ} (Hz)	v_{ent} (m/s)	D_{ent} (mm)	ΔV_{ent} (dm^3)	Δt_{ent} (min)	v_{sai} (m/s)	D_{sai} (mm)	ΔV_{sai} (dm^3)	Δt_{sai} (min)	$isoc_{ent}$ (%)	$isoc_{sai}$ (%)
60	28,8	3	132	14	28,38	3	425,1	42	**97,1**	**102,7**
50	25,07	3	131	14	23,37	3	659	70	**103,5**	**106,8**
40	20,23	3	93,1	14	18,06	3	172,3	28,5	**95,3**	**92,3**
30	1,55	3	124	21	13,47	3	157,3	26	**105,8**	**119,2**

BIBLIOTECA F.E. PORTO

Tabela 28 – Eficiência isocinética com recirculação

f_{princ} (Hz)	60	50	40	50	50	50
f_{aux} (Hz)	50	50	50	40	30	20
v_{ent} (m/s)	23,62	16,2	6,92	19,5	25,5	27,15
D_{ent} (mm)	3	3	5	3	3	3
ΔV_{ent} (dm^3)	117,2	131	94,5	101,8	125,4	125,4
Δt_{ent} (min)	14	21	14	14	14	14
v_{rec} (m/s)	8,92	7,80	10,10	18,53	5,52	6,36
D_{rec} (mm)	5	5	4	3	6	6
ΔV_{rec} (dm^3)	1035,5	884,7	3,91	873,4	975,4	1077,8
Δt_{rec} (min)	120	100	60	120	120	120
v_{sai} (m/s)	21,56	14,90	7,21	7,24	23,86	25,45
D_{sai} (mm)	3	3	5	5	3	3
ΔV_{sai} (dm^3)	552	400,7	264,2	480	644	322,5
Δt_{sai} (min)	70	70	34	70	70	35
$isoc_{ent}$ (%)	**104,0**	**106,5**	**100,2**	**106,4**	**101,2**	**96,2**
$isoc_{rec}$ (%)	**100,2**	**109,9**	**100,2**	**103,1**	**102,2**	**99,2**
$isoc_{sai}$ (%)	**103,6**	**110,4**	**104,0**	**102,9**	**108,7**	**101,7**

De referir que, de um modo geral, os valores obtidos se encontram dentro da gama referida, com excepção do ensaio sem recirculação, com frequência do ventilador a 30Hz, que se afasta razoavelmente do limite superior estipulado devido a possíveis erros experimentais.

A eficiência global dos ciclones a funcionar sem recirculação foi calculada a partir da expressão:

$$\eta = \frac{\dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sai}}{\dot{m}_{ent}} \times 100\% \qquad (18)$$

Sendo: η – eficiência global do sistema (%), $\dot{m}_{ent}$ – caudal mássico à entrada do sistema (kg/s) e $\dot{m}_{sai}$ – caudal mássico à saída do sistema (kg/s).

A eficiência da recirculação do sistema a funcionar com recirculador foi obtida através da equação:

$$\eta_{rec} = \frac{\dot{m}_{rec}}{\dot{m}_{sai} + \dot{m}_{rec}} \times 100\% \qquad (19)$$

Sendo: η_{rec} – eficiência da recirculação (%) e $\dot{m}_{rec}$ – caudal mássico à saída do recirculador (kg/s).

Para levar a cabo o cálculo da eficiência é necessário conhecer o caudal mássico de entrada e saída do sistema, sendo esta a razão entre a massa de pó recolhida nos filtros e o tempo de amostragem.

5.2.1.1 Sistema sem Recirculação

A Tabela 29 inclui os valores de eficiência global para o processo a decorrer sem recirculação, bem como a informação experimental recolhida com este fim (condições do medidor, base seca).

Tabela 29 – Eficiências globais sem recirculação

f_{princ} (Hz)	T_{ent} (K)	P_{ent} (kPa)	Δm_{ent} (g)	Δt_{ent} (min)	T_{sai} (K)	P_{sai} (kPa)	Δm_{sai} (g)	Δt_{sai} (min)	η (%)
60	300,6	101,3	1,2889	14	300,6	101,3	0,0421	42	**98,91**
50	307,2	101,3	1,0878	14	307,2	101,3	0,0864	70	**98,41**
40	301,2	101,3	0,6741	14	301,2	101,3	0,0106	28,7	**98,84**
30	302,5	101,3	0,4818	21	302,5	101,3	0,0160	26	**97,32**

Para melhor visualização dos resultados obtidos apresenta-se a Figura 76, que representa a variação da eficiência global com o caudal do ciclone.

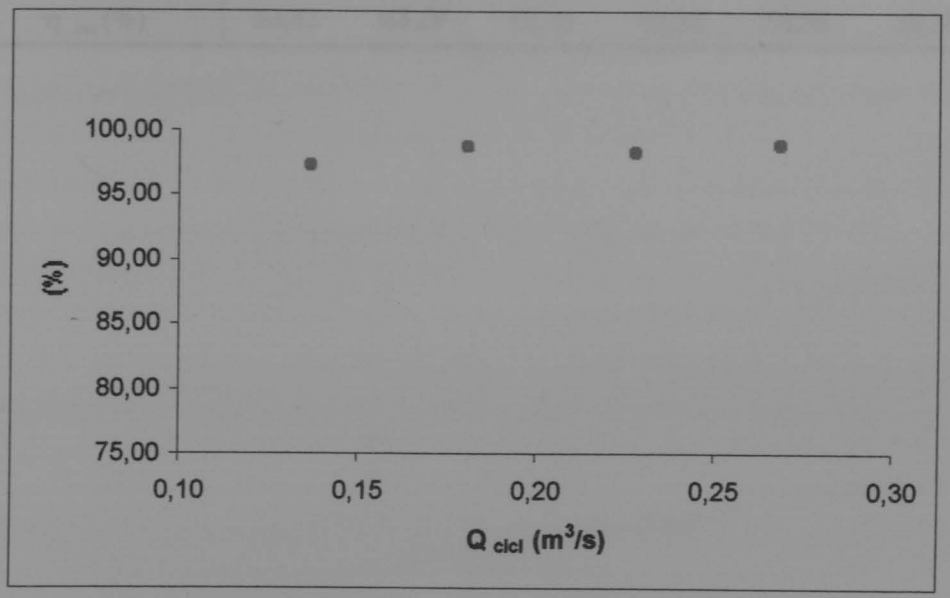


Figura 76 – Eficiência global *versus* caudal do ciclone sem recirculação

Como se pode observar, os valores de eficiência são muito elevados. O caso mais favorável acontece quando o ventilador principal opera a 60Hz, muito embora não seja possível isolar um ponto óptimo de operação uma vez que os valores são muito similares e não apresentam uma tendência definida.

5.2.1.2 Sistema com Recirculação

Na Tabela 30 apresentam-se os valores de eficiência global e eficiência de recirculação para o processo a funcionar com recirculação. Incluem-se também os dados experimentais necessários para o cálculo das mesmas (condições do medidor, base seca).

Tabela 30 – Eficiências globais (com recirculação)

f_{princ} (Hz)	60	50	40	50	50	50
f_{aux} (Hz)	50	50	50	40	30	20
T_{ent} (K)	304,3	303,2	304,2	303,8	301,1	302,4
P_{ent} (kPa)	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3
Δm_{ent} (g)	0,7434	0,654	0,9709	0,5282	0,8514	1,3658
Δt_{ent} (min)	14	21	14	14	14	14
T_{rec} (K)	301	300,2	3,019	304,4	299,6	304,5
P_{rec} (kPa)	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3
Δm_{rec} (g)	0,0521	0,0564	0,0286	0,0306	0,1864	0,1921
Δt_{rec} (min)	120	100	60	120	120	120
T_{sai} (K)	301,8	300,2	303,9	303	303,7	303,9
P_{sai} (kPa)	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3
Δm_{sai} (g)	0,0265	0,00419	0,0131	0,0243	0,0756	0,1296
Δt_{sai} (min)	70	70	34	70	70	35
η (%)	**99,22**	**99,35**	**99,44**	**99,08**	**98,22**	**96,20**
η_{rec} (%)	**53,42**	**43,29**	**55,30**	**42,34**	**58,98**	**30,18**

Com o intuito de proporcionar uma visualização mais efectiva dos resultados obtidos apresenta-se a Figura 77, que mostra a influência do caudal à entrada no ciclone na eficiência global.

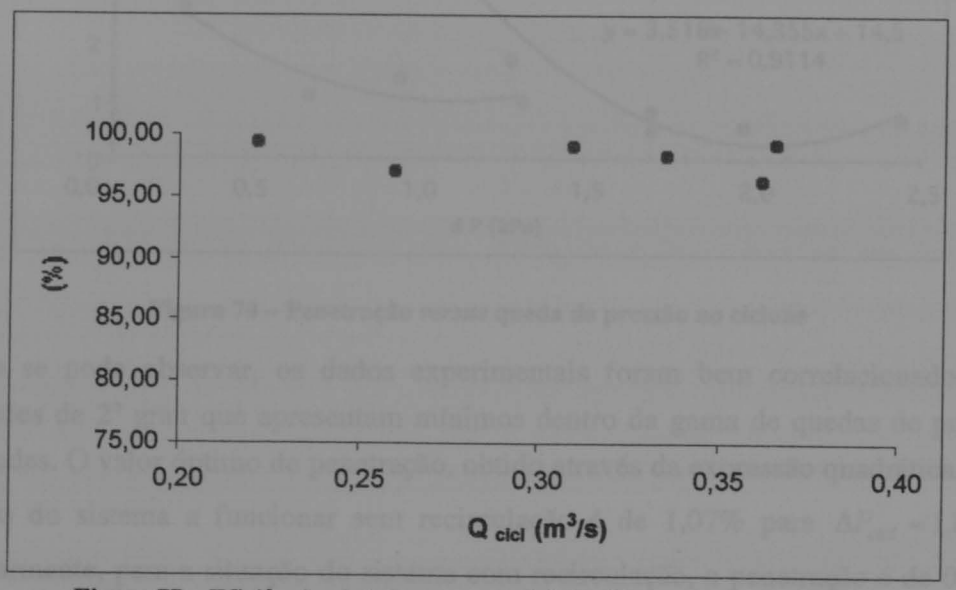


Figura 77 – Eficiência global *versus* caudal do ciclone com recirculação

Por análise da Tabela 30, conclui-se que o valor óptimo de eficiência se verifica com o ventilador principal a operar a 40Hz e o auxiliar a 50Hz. Esta situação corresponde ao valor mais alto de frequência do ventilador auxiliar e mais baixo do ventilador principal testados nas instalações piloto, ou seja, no caso em que a recirculação do gás é mais favorecida.

5.2.1.3 Análise Conjunta dos Resultados

Aquando do estudo do ciclone RS_VHE à escala laboratorial, conclui-se que este melhorava a eficiência de remoção de partículas comparativamente aos ciclones actualmente colocados no mercado, em cerca de 50% quando sem recirculação e 75% com recirculação [2]. Este facto é confirmado pelos dados obtidos à escala piloto na remoção de ácido sulfanílico no gás do processo na instalação fabril.

A Figura 78 representa a penetração, ou seja, a diferença entre 100 e a eficiência expressa em percentagem, como função da queda de pressão no ciclone para o sistema sem recirculação e da queda de pressão total para o sistema com recirculação.

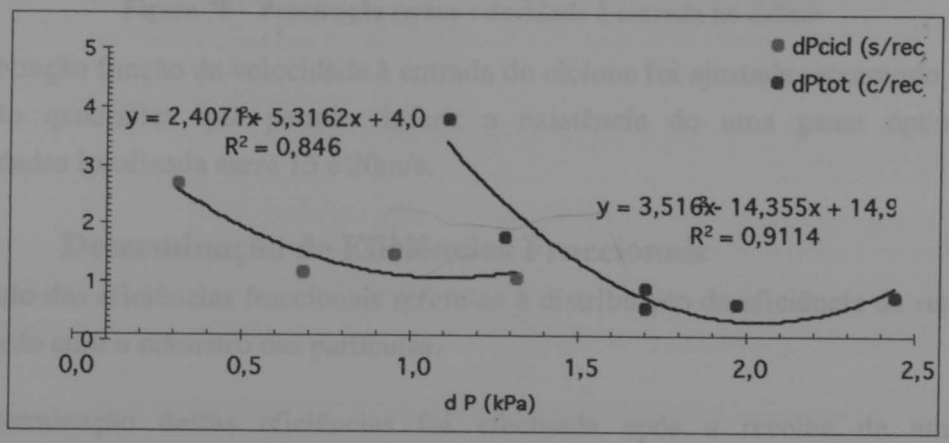


Figura 78 – Penetração *versus* queda de pressão no ciclone

Como se pode observar, os dados experimentais foram bem correlacionados por equações de 2° grau que apresentam mínimos dentro da gama de quedas de pressão estudadas. O valor óptimo de penetração, obtido através da expressão quadrática, para o caso do sistema a funcionar sem recirculação é de 1,07% para $\Delta P_{cicl} = 1{,}1kPa$. Similarmente, para a situação do sistema com recirculação, a penetração é de 0,33% quando $\Delta P_{cicl} = 2{,}04kPa$. Como referido anteriormente, é possível apreciar através da Figura 78 que com recirculação a eficiência obtida é superior.

De salientar que, a falta de dados experimentais para quedas de pressão superiores pode levar a curvas de ajuste ligeiramente diferentes das verdadeiras. Este lapso de pontos à direita do gráfico deve-se a limitações na potência fornecida pelos ventiladores da instalação piloto.

A Figura 79 apresenta a variação da penetração com a velocidade à entrada do ciclone, obtida quer para o sistema com recirculação, quer para sem recirculação.

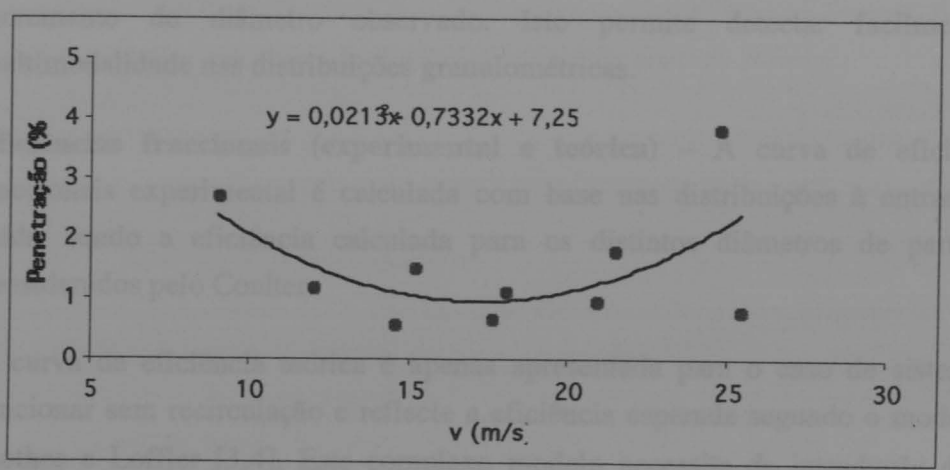


Figura 79 – Penetração *versus* velocidade à entrada no ciclone

A penetração função da velocidade à entrada do ciclone foi ajustada recorrendo a uma equação quadrática que permite inferir a existência de uma gama óptima de velocidades localizada entre 15 e 20m/s.

5.2.2 Determinação de Eficiências Fraccionais

O estudo das eficiências fraccionais refere-se à distribuição da eficiência de remoção de acordo com o diâmetro das partículas.

A determinação destas eficiências foi efectuada após a recolha de amostras isocinéticas. Uma pequena quantidade de pó foi então retirada e suspensa em álcool, com o auxílio de ultra-sons que assim separaram possíveis aglomerados de partículas. Esta dispersão foi introduzida no Coulter, um aparelho que mede o volume de partículas existente na mistura com um determinado diâmetro, obtendo-se desta forma uma curva de distribuição.

Os resultados desta Secção são fundamentalmente visualizados em três tipo de gráficos distintos:

- **Distribuição em Volume (volume *versus* diâmetro das partículas)** – Estes gráficos exprimem a quantidade, em termos de volume, existente na suspensão de partículas com diferentes diâmetros. O aparelho de medição efectua um varrimento mais minucioso para diâmetros mais reduzidos, de modo que estas curvas de dispersão são apresentadas sob a forma semi-logarítmica.

- **Derivada da distribuição cumulativa (volume/Δdiâmetro *versus* diâmetro das partículas)** – De forma a que seja possível ter uma ideia do declive da distribuição cumulativa divide-se cada volume medido no aparelho pelo incremento de diâmetro observado. Isto permite detectar facilmente a multimodalidade nas distribuições granulométricas.

- **Eficiências fraccionais (experimental e teórica)** – A curva de eficiências fraccionais experimental é calculada com base nas distribuições à entrada e à saída, sendo a eficiência calculada para os distintos diâmetros de partículas considerados pelo Coulter.

  A curva de eficiência teórica é apenas apresentada para o caso de sistemas a funcionar sem recirculação e reflecte a eficiência esperada segundo o modelo de Mothes e Loffler [3,4]. Este complexo modelo necessita da introdução de um

parâmetro variável – difusividade turbulenta das partículas – que pode ser estimado pela equação [5]:

$$Pe_p = 0{,}0342 \cdot \mathrm{Re}_p^{1{,}263} \tag{20}$$

Representando $\mathbf{Pe_p}$, o número de Peclet e $\mathbf{Re_p}$, o de Reynolds, ambos avaliados nas partículas. Estes números adimensionais são calculados, respectivamente, através das expressões:

$$Pe_p = \frac{u_r \cdot d_p}{D_r} \tag{21}$$

$$\mathrm{Re}_p = \frac{\rho \cdot d_p \cdot u_r}{\mu} \tag{22}$$

Sendo: u_r – velocidade radial das partículas, d_p – diâmetro das partículas, D_r –difusividade turbulenta das partículas, ρ – massa volúmica do fluído e μ – viscosidade do fluído (variáveis expressas em unidades do sistema internacional).

Segundo estudos elaborados pelo Director do projecto, este modelo é o que melhor representa o comportamento do ciclone RS_VHE, como aliás é possível constatar por observação dos gráficos que se seguem.

Sempre que nos gráficos esteja presente a inscrição - *corr*, tal representa que os valores foram normalizados para que a distribuição cumulativa resultasse em 100%, uma vez que devido a limitações do aparelho de medição nem sempre era este o caso. As inscrições *in*, *out* e *catch* significam, respectivamente, entrada do sistema, saída do sistema e recipiente de recolha de partículas após separação no ciclone.

A análise sistemática através deste tipo de representação foi realizada para todos os casos estudados, nomeadamente, com o sistema a funcionar com e sem recirculação.

5.2.2.1 Sistema sem Recirculação

As Figuras 80 a 91 apresentam os três tipos de gráficos descritos anteriormente, para o sistema a funcionar sem recirculação.

- Frequência do Ventilador Principal de 30Hz

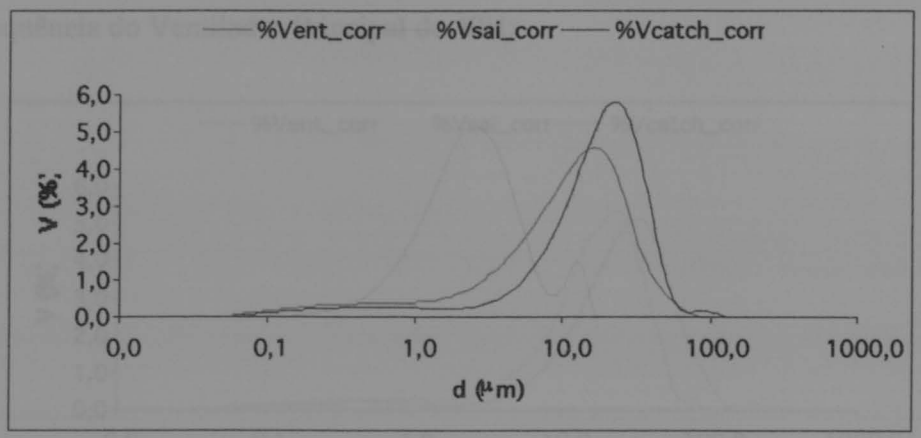


Figura 80 – Distribuição em volume (f_{prin}=30Hz, f_{aux}=0Hz)

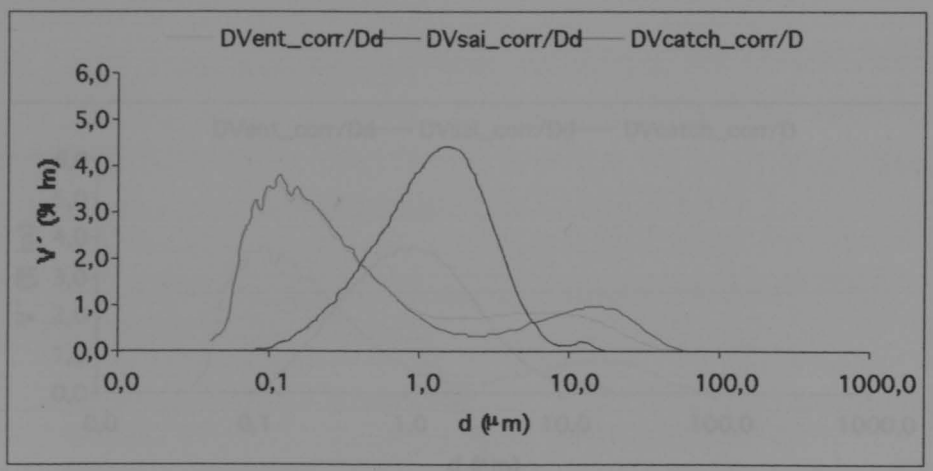


Figura 81 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=30Hz, f_{aux}=0Hz)

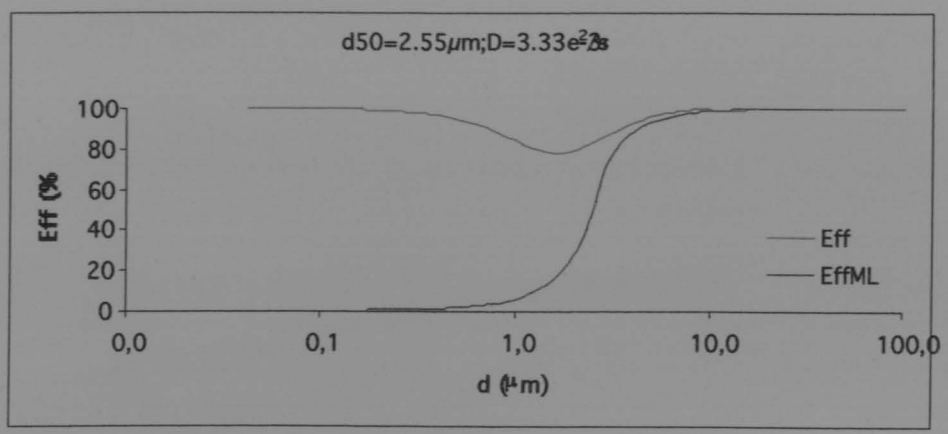


Figura 82 – Eficiências fraccionais - experimental e teórica (f_{prin}=30Hz, f_{aux}=0Hz)

- Frequência do Ventilador Principal de 40Hz

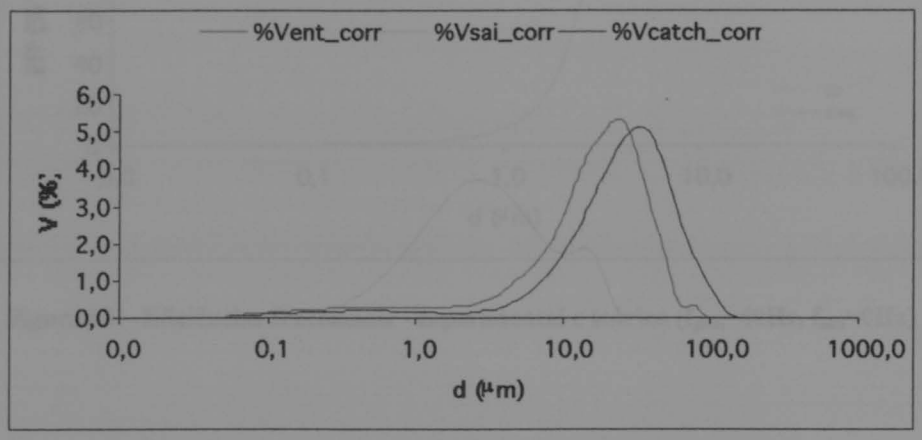


Figura 83 – Distribuição em volume (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=0Hz)

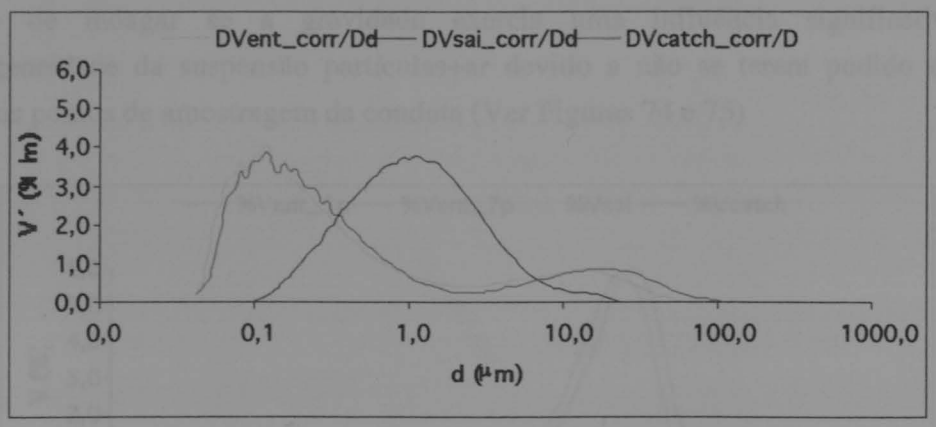


Figura 84 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=0Hz)

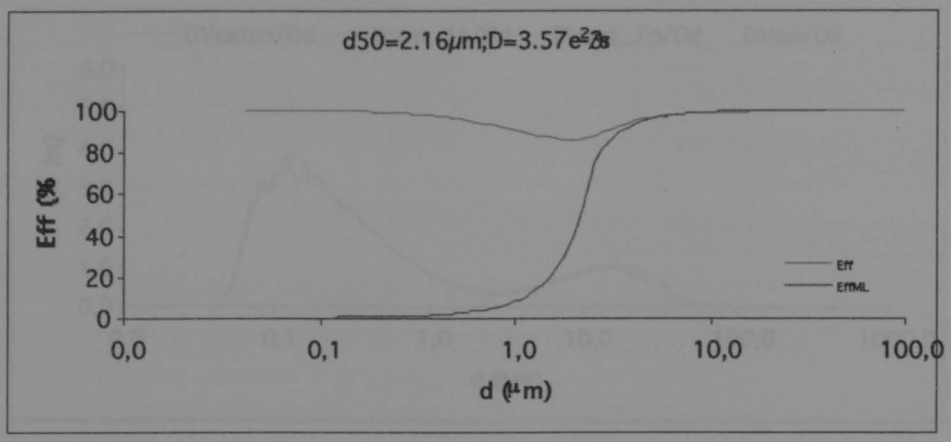


Figura 85 – Eficiências fraccionais - experimental e teórica (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=0Hz)

- Frequência do Ventilador Principal de 50Hz

Para este ensaio em particular, foram retiradas amostras isocinéticas nos sete pontos habituais e num ponto localizado no centro da conduta. Tal foi efectuado com o intuito de indagar se a gravidade exercia uma influência significativa na homogeneidade da suspensão partículas+ar devido a não se terem podido utilizar todos os pontos de amostragem da conduta (Ver Figuras 74 e 75)

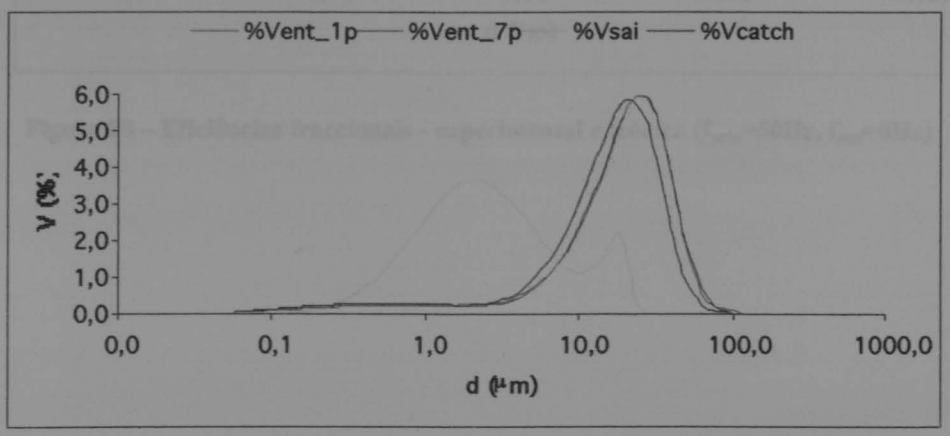


Figura 86 – Distribuição em volume (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=0Hz)

Como se verifica por inspecção visual, a suspeita acima referida não se concretiza (as curvas são coincidentes) considerando assim o gás do processo com concentração uniforme.

BIBLIOTECA F.E. PORTO

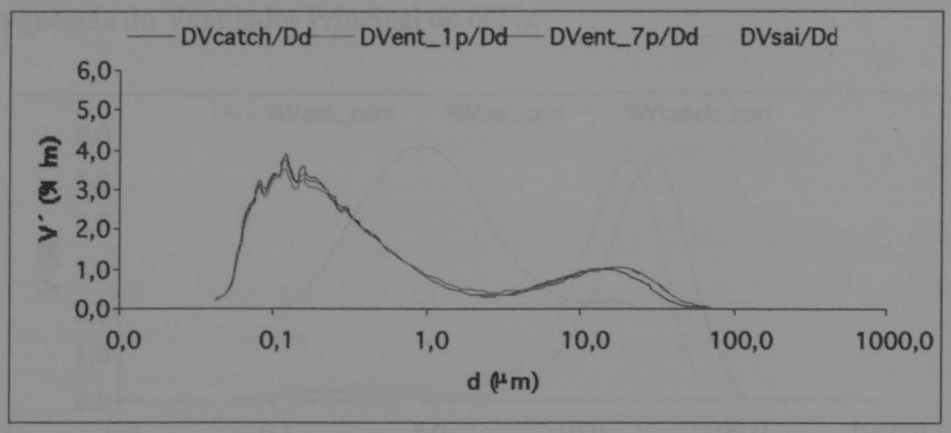


Figura 87 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=0Hz)

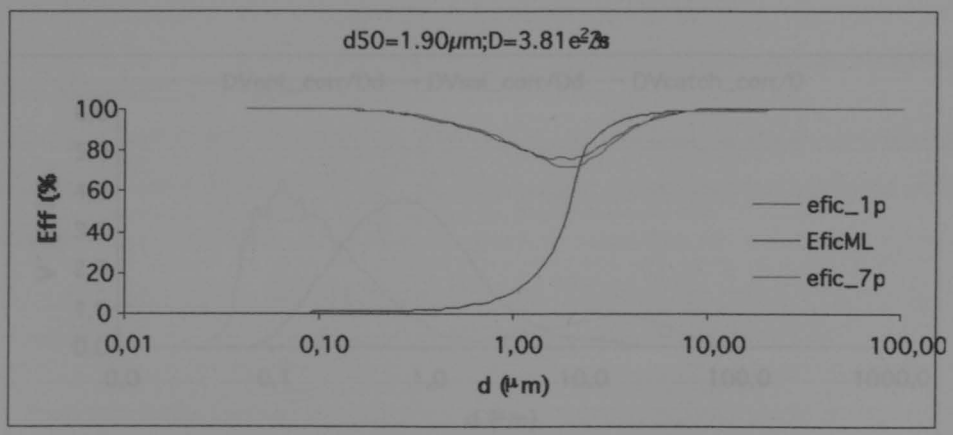


Figura 88 – Eficiências fraccionais - experimental e teórica (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=0Hz)

- Frequência do Ventilador Principal de 60Hz

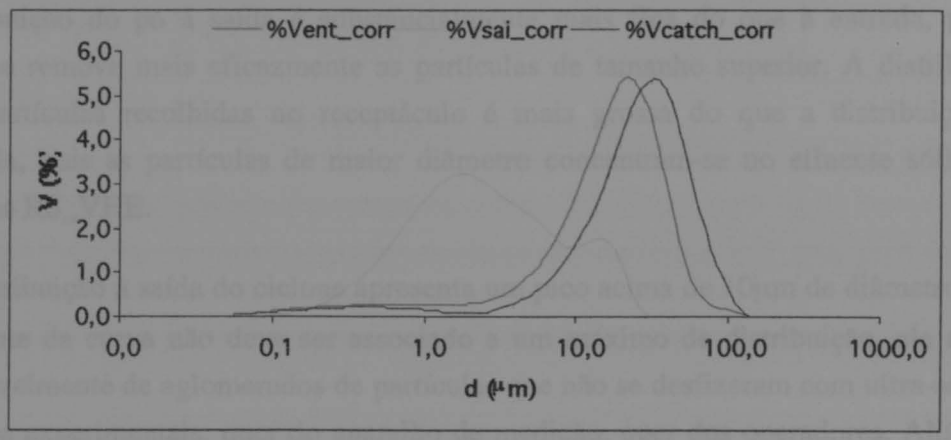


Figura 89 – Distribuição em volume (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=0Hz)

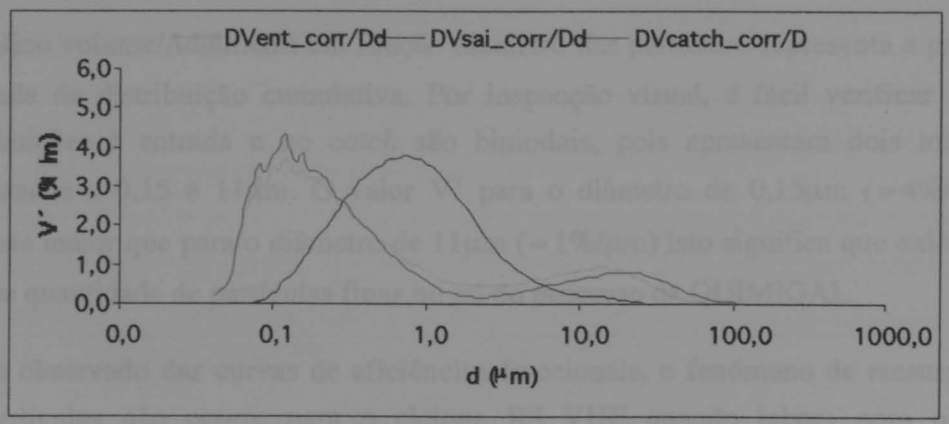


Figura 90 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=0Hz)

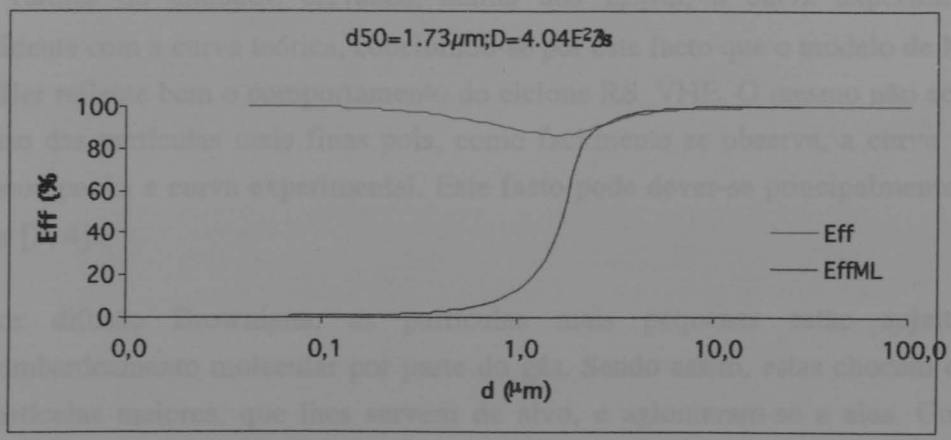


Figura 91 – Eficiências fraccionais - experimental e teórica (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=0Hz)

Por análise dos gráficos que representam o volume em função do diâmetro das partículas para resultados sem recirculação, conclui-se, como seria de esperar, que a distribuição do pó à saída é substancialmente mais fina do que à entrada, pois o ciclone remove mais eficazmente as partículas de tamanho superior. A distribuição das partículas recolhidas no receptáculo é mais grossa do que a distribuição de entrada, pois as partículas de maior diâmetro concentram-se no efluente sólido do ciclone RS_VHE.

A distribuição à saída do ciclone apresenta um pico acima de 10μm de diâmetro. Este acidente da curva não deve ser associado a um máximo de distribuição, ele advém provavelmente de aglomerados de partículas que não se desfizeram com ultra-sons ou a erros experimentais, quer do aparelho de medição, quer dos operadores. Aliás, por observação das curvas de entrada e no *catch*, nada indica a existência da predominância de partículas superiores ao diâmetro referido.

O gráfico volume/Δdiâmetro em função diâmetro das partículas representa a primeira derivada da distribuição cumulativa. Por inspecção visual, é fácil verificar que as distribuições à entrada e no *catch* são bimodais, pois apresentam dois máximos localizados a 0,15 e 11μm. O valor V' para o diâmetro de 0,15μm (≈4%/μm) é bastante maior que para o diâmetro de 11μm (≈1%/μm) isto significa que existe uma grande quantidade de partículas finas no pó do processo da QUIMIGAL.

Como observado das curvas de eficiências fraccionais, o fenómeno de ressuspensão de partículas não ocorre para o ciclone RS_VHE quando labora com o ácido sulfanílico do processo, se tal acontecesse verificar-se-ia um decréscimo das eficiências para elevados diâmetros.

Para valores de diâmetro elevados, acima dos 2,5μm, a curva experimental é coincidente com a curva teórica, concluindo-se por este facto que o modelo de Mothes e Loffler reflecte bem o comportamento do ciclone RS_VHE. O mesmo não acontece no caso das partículas mais finas pois, como facilmente se observa, a curva teórica não acompanha a curva experimental. Este facto pode dever-se principalmente a três razões [3, 4]:

- Por difusão Browniana, as partículas mais pequenas estão sujeitas ao bombardeamento molecular por parte do gás. Sendo assim, estas chocam com as partículas maiores, que lhes servem de alvo, e aglomeram-se a elas. Como as partículas de tamanho superior são eficazmente removidas do fluído, então as partículas mais pequenas e aglomeradas serão consequentemente removidas.

- Para concentrações elevadas de partículas no gás, da ordem de $10g/m^3$, é possível ocorrer o bloqueamento do vórtice ascendente por parte das partículas grandes. Desta forma as pequenas chocam com as partículas bloqueantes e voltam a descer, sendo recolhidas na base do ciclone.

- Para concentrações de partículas no gás superiores a $2g/m^3$, acredita-se que as partículas finas poderão não entrar no ciclone individualizadamente, estando sob a forma de aglomerados e comportando-se do mesmo modo que partículas de diâmetro superior. Sendo assim, quando se traçam as curvas de distribuição no Coulter, e como a solução sofre um tratamento prévio com ultra-sons, as partículas desaglomeram-se e são detectadas como partículas isoladas. Esta é a explicação mais razoável para as experiências realizadas.

Por análise das curvas de eficiência fraccional experimentais, verifica-se que a curvatura destas vai diminuindo à medida que a frequência do ventilador principal aumenta. Esta situação indica que para caudais de alimentação ao ciclone superiores, a eficiência de remoção é menos sensível ao diâmetro das partículas.

5.2.2.2 Sistema com Recirculação

As Figuras 92 a 109 apresentam os três tipos de gráficos para o sistema a funcionar com recirculação, agrupados segundo a constância da frequência nos ventiladores, designadamente, frequência do ventilador principal de 50Hz e frequência do ventilador auxiliar de 50Hz.

Frequência do Ventilador Principal de 50Hz

- Frequência do Ventilador Auxiliar de 20Hz

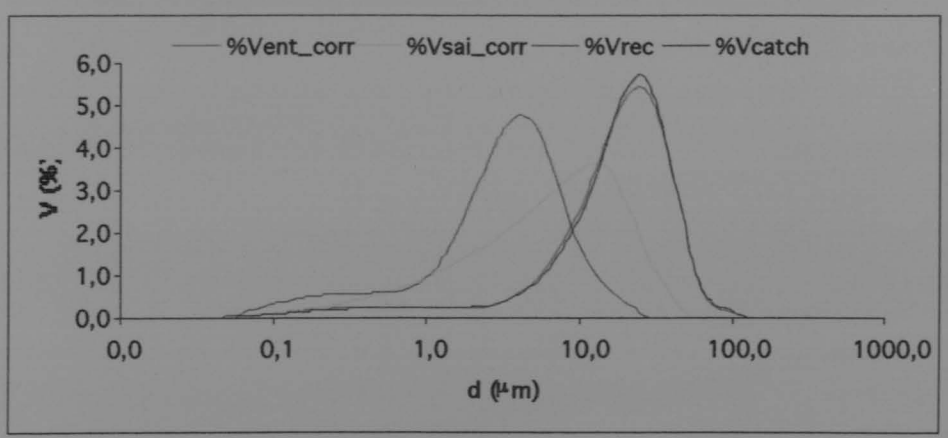


Figura 92 – Distribuição em volume (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=20Hz)

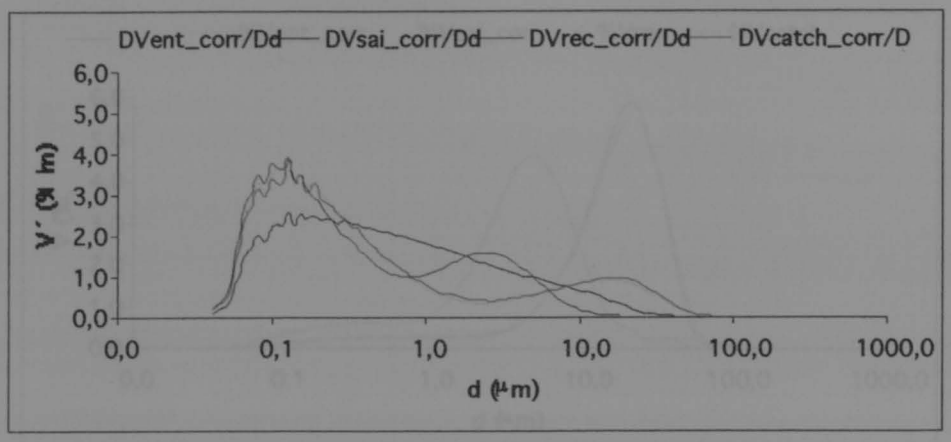


Figura 93 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=20Hz)

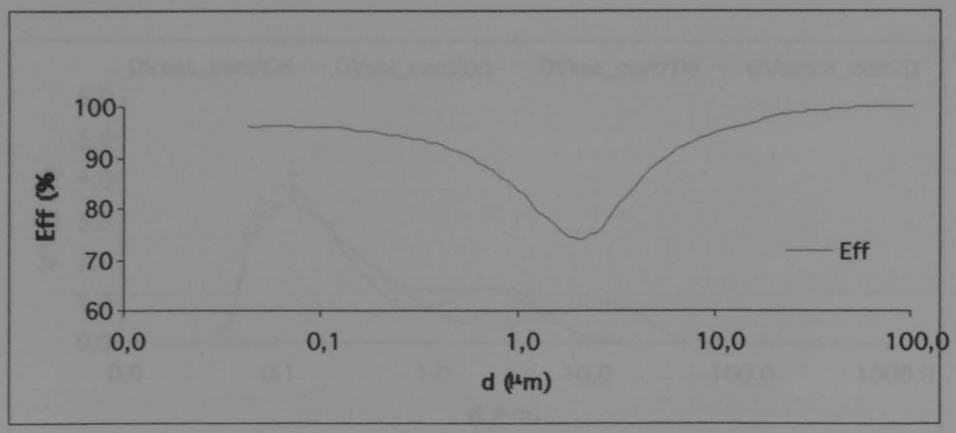


Figura 94 – Eficiências fraccionais - experimental (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=20Hz)

- Frequência do Ventilador Auxiliar de 30Hz

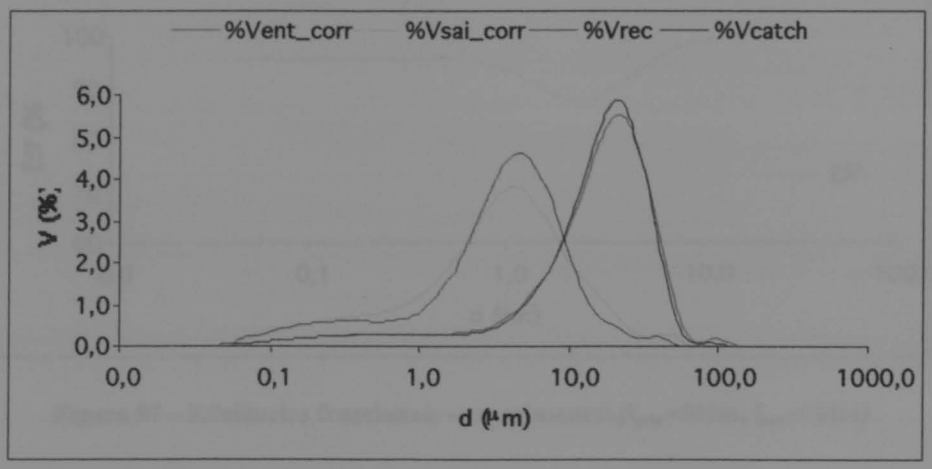


Figura 95 – Distribuição em volume (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=30Hz)

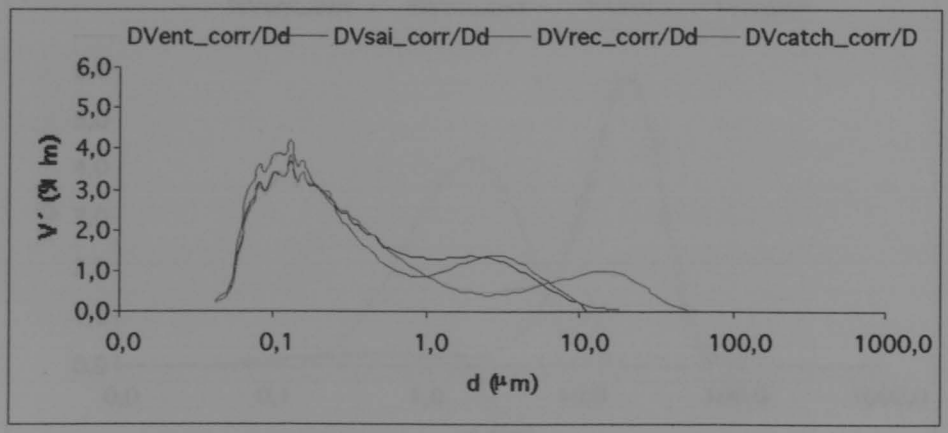


Figura 96 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=30Hz)

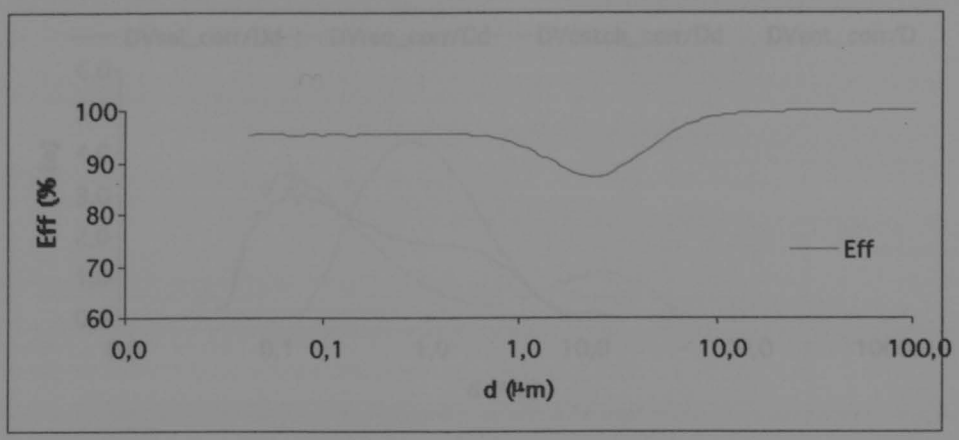


Figura 97 – Eficiências fraccionais - experimental (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=30Hz)

- Frequência do Ventilador Auxiliar de 40Hz

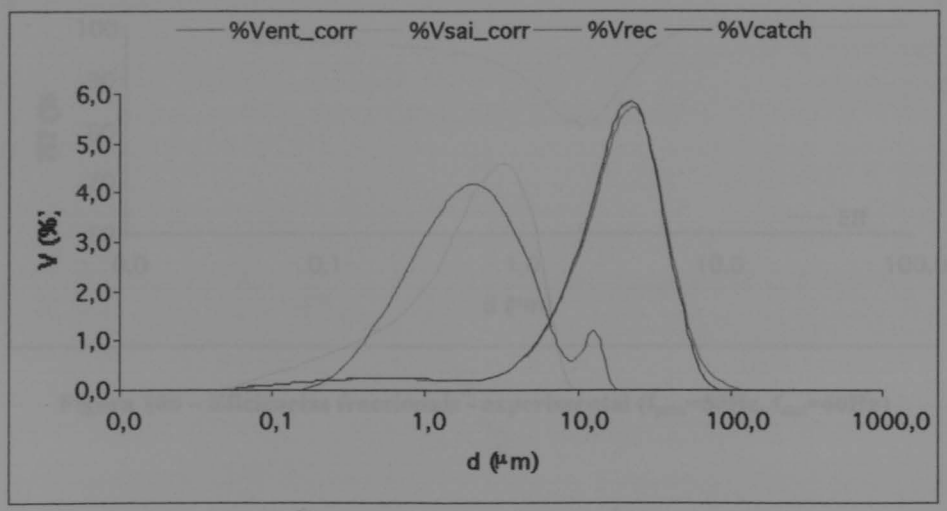


Figura 98 – Distribuição em volume (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=40Hz)

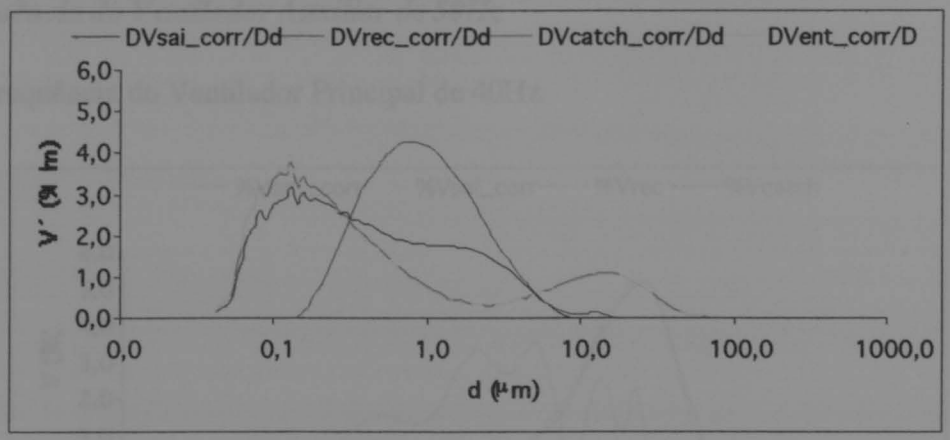


Figura 99 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=40Hz)

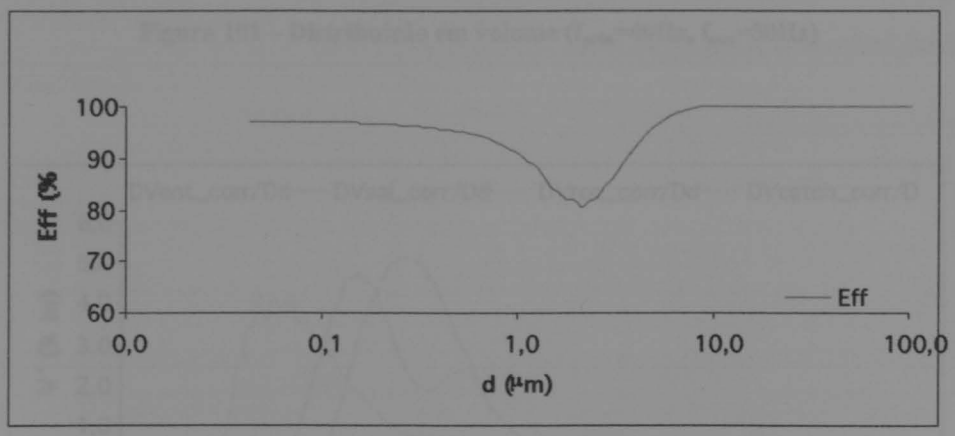


Figura 100 – Eficiências fraccionais - experimental (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=40Hz)

Frequência do Ventilador Auxiliar de 50Hz

- Frequência do Ventilador Principal de 40Hz

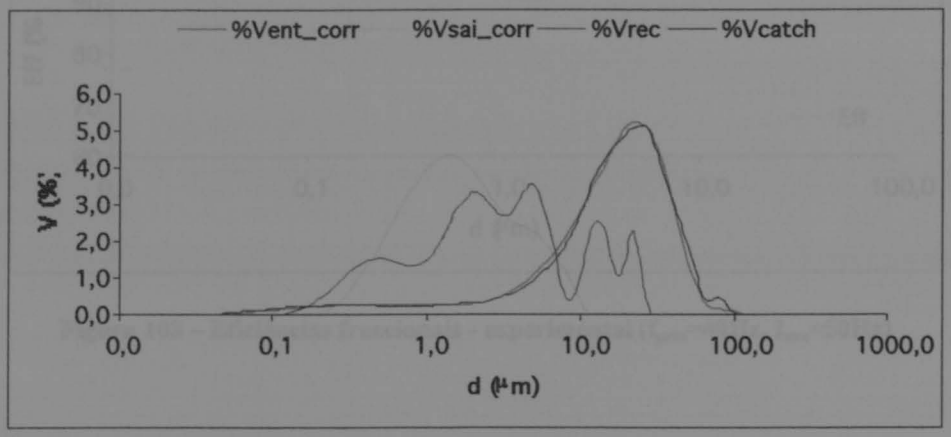


Figura 101 – Distribuição em volume (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=50Hz)

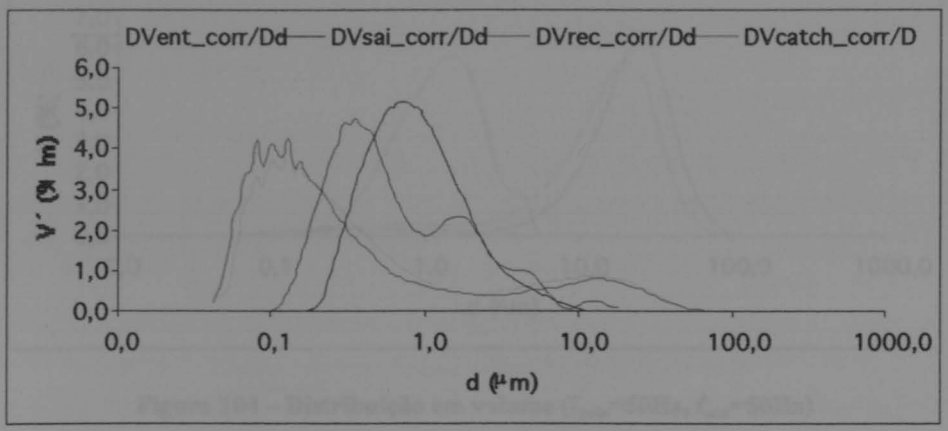


Figura 102 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=50Hz)

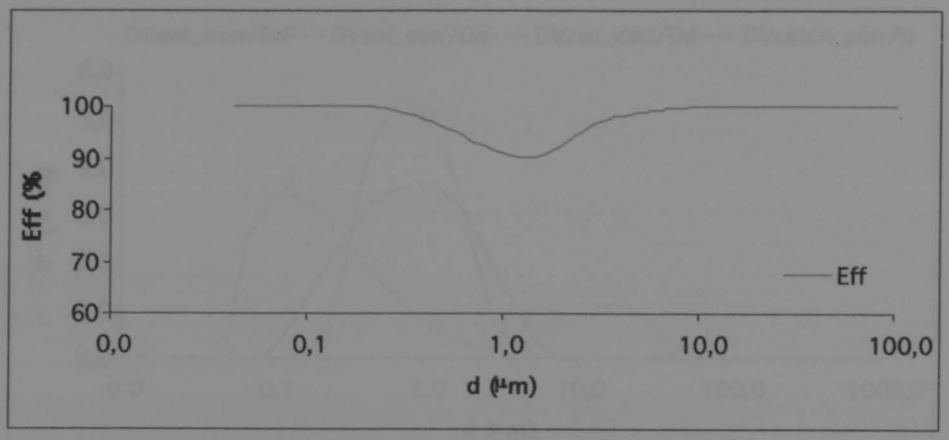


Figura 103 – Eficiências fraccionais - experimental (f_{prin}=40Hz, f_{aux}=50Hz)

- Frequência do Ventilador Principal de 50Hz

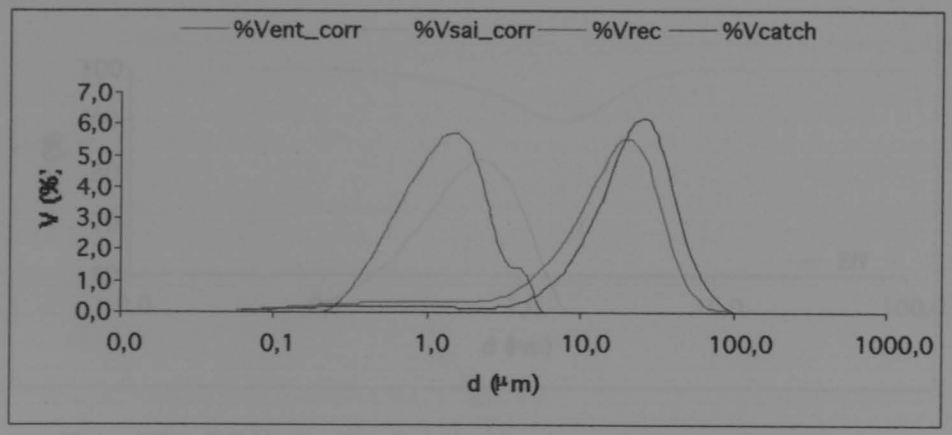


Figura 104 – Distribuição em volume (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=50Hz)

BIBLIOTECA F.E. PORTO

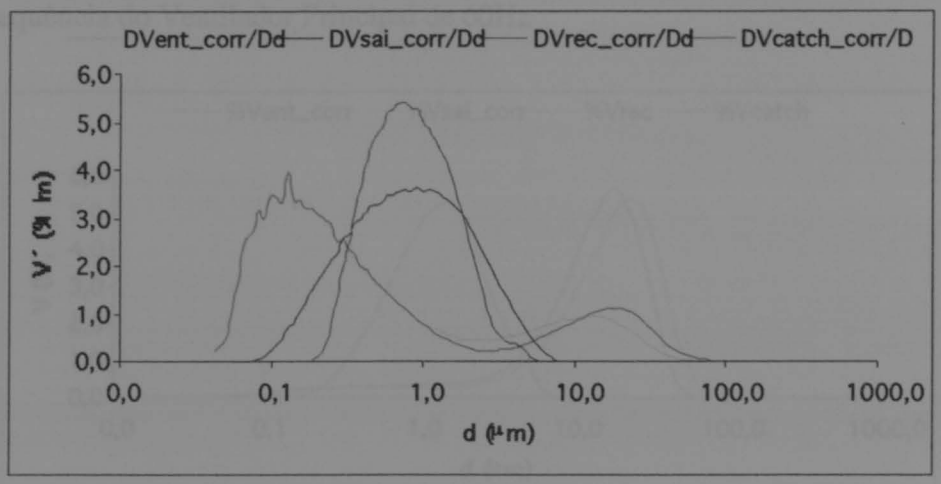


Figura 105 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=50Hz)

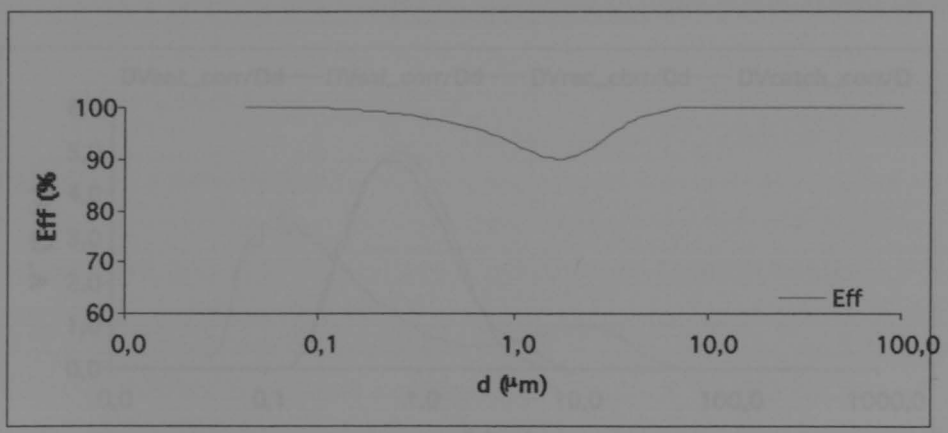


Figura 106 – Eficiências fraccionais - experimental (f_{prin}=50Hz, f_{aux}=50Hz)

- Frequência do Ventilador Principal de 60Hz

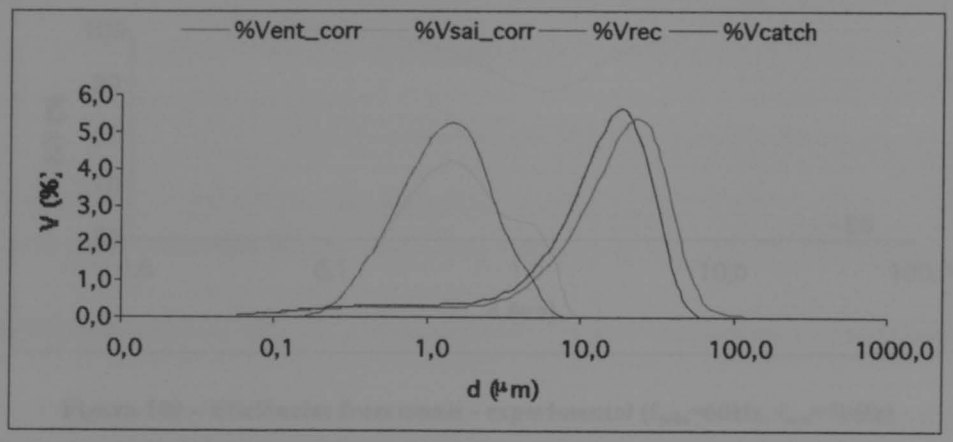


Figura 107 – Distribuição em volume (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=50Hz)

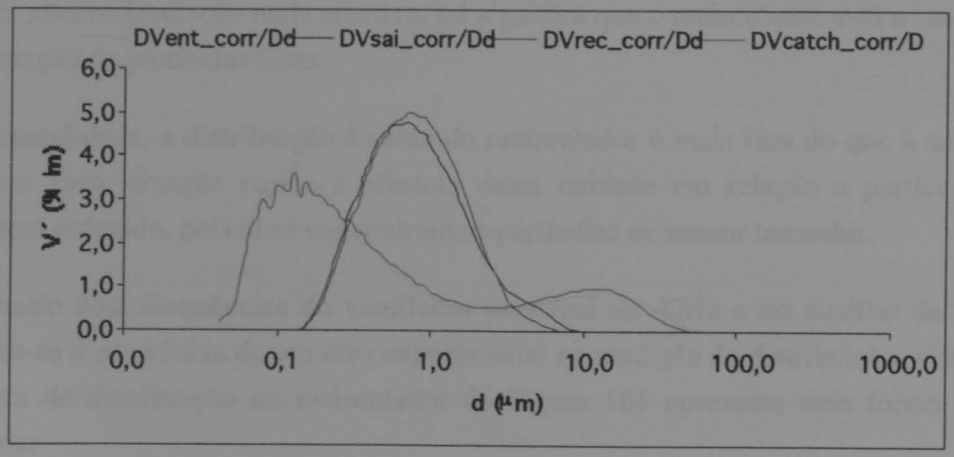


Figura 108 – Derivada da distribuição cumulativa (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=50Hz)

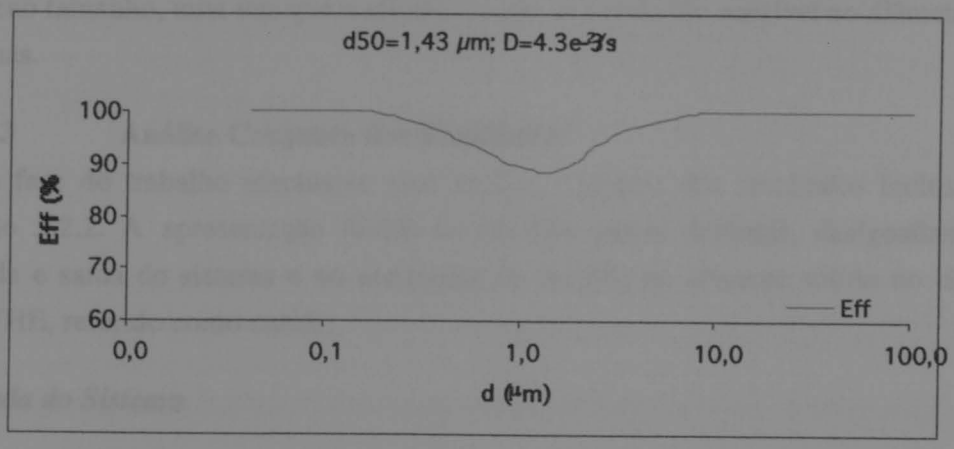


Figura 109 – Eficiências fraccionais - experimental (f_{prin}=60Hz, f_{aux}=50Hz)

Analisando os gráficos que representam o volume em função do diâmetro das partículas, verifica-se que a distribuição na entrada e no *catch* é semelhante quando se realiza uma recirculação mais efectiva, tal significa que o recirculador está a funcionar na remoção de partículas finas.

Na generalidade, a distribuição à saída do recirculador é mais fina do que à saída do sistema. Esta situação realça a eficácia desta unidade em relação a partículas de diâmetro reduzido, pois aí se concentram as partículas de menor tamanho.

No ensaio com frequências do ventilador principal de 40Hz e do auxiliar de 50Hz, registra-se a ocorrência de um erro experimental na medição da distribuição, visto que a curva de distribuição no recirculador da Figura 101 apresenta uma forma muito irregular

A partir dos gráficos volume/Δdiâmetro em função diâmetro das partículas é possível verificar que as distribuições na entrada e no *catch* apresentam bimodalidade, encontrando-se os dois pontos máximos localizados na mesma zona que no caso do sistema a funcionar sem recirculação. Tal facto era de esperar uma vez que o pó alimentado à instalação piloto, proveniente da QUIMIGAL, era o mesmo.

Nos gráficos de eficiência fraccional não se apresentam as curvas das eficiências teóricas esperadas para o sistema constituído pelo ciclone RS_VHE e pelo recirculador, por falta de um modelo teórico que represente este conjunto.

Por inspecção visual deste tipo de gráficos, observa-se que à medida que a razão de recirculação aumenta as curvas de eficiência fraccional experimentais se esbatem. Este facto significa que a recirculação está a funcionar na remoção de partículas de

pequeno tamanho, uma vez que a eficiência não se revela tão sensível ao diâmetro das mesmas.

5.2.2.3 Análise Conjunta dos Resultados

Nesta fase do trabalho efectua-se uma análise conjunta dos resultados inclusos na Secção 5.2.2. A apresentação divide-se em três partes distintas, designadamente, entrada e saída do sistema e no recipiente de recolha do efluente sólido do ciclone RS_VHE, referido como *catch*.

Entrada do Sistema

A Figura 110 representa o volume detectado no Coulter em função do diâmetro das partículas, funcionando o sistema com e sem recirculação.

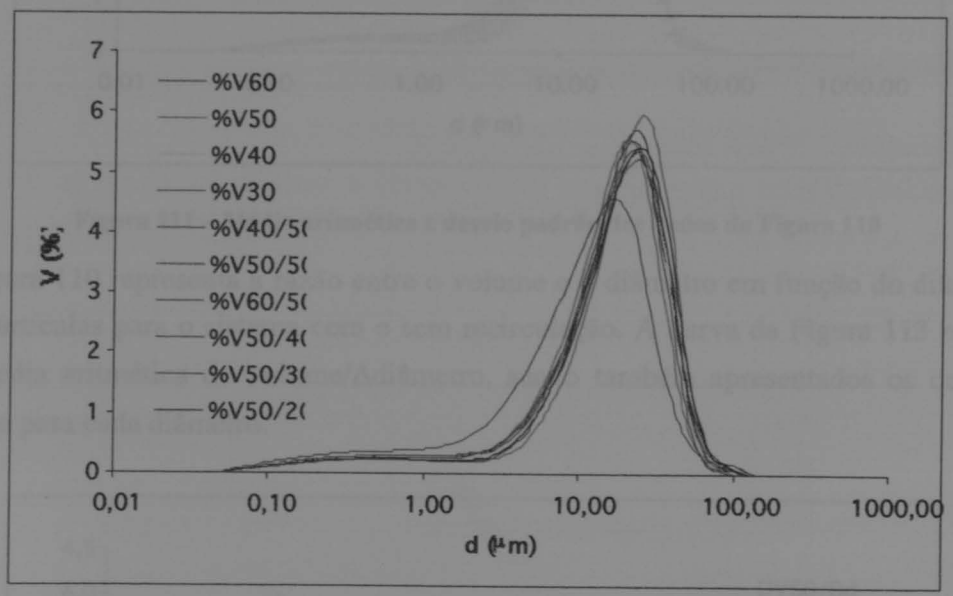


Figura 110 – Distribuição em volume, com e sem recirculação, à entrada

Como se pode observar, por análise do gráfico, a distribuição à entrada é similar, com excepção do ensaio com frequência do ventilador principal a 30Hz e do ventilador auxiliar nula. Este facto indica que a granulometria do ácido sulfanílico é constante devido à estabilidade do processo de produção.

Acredita-se que a distribuição do diâmetro das partículas à entrada é definida nos reactores, ocorrendo possíveis aglomerações de partículas de pó no secador que precede o ciclone da QUIMIGAL e consequentemente o ciclone RS_VHE.

A curva da Figura 111 representa a média aritmética do volume à entrada medido no Coulter, bem como os desvios padrão, para cada diâmetro. Este gráfico apresenta baixos valores de dispersão que reafirmam a estabilidade do processo.

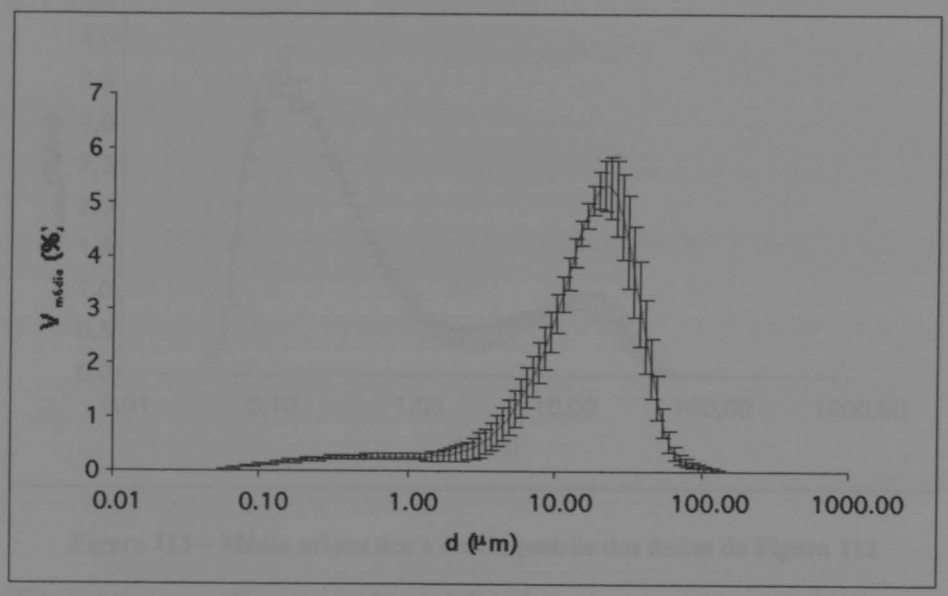


Figura 111 – Média aritmética e desvio padrão dos dados da Figura 110

A Figura 110 representa a razão entre o volume e o diâmetro em função do diâmetro das partículas para o sistema com e sem recirculação. A curva da Figura 113 resulta da média aritmética do volume/Δdiâmetro, sendo também apresentados os desvios padrão para cada diâmetro.

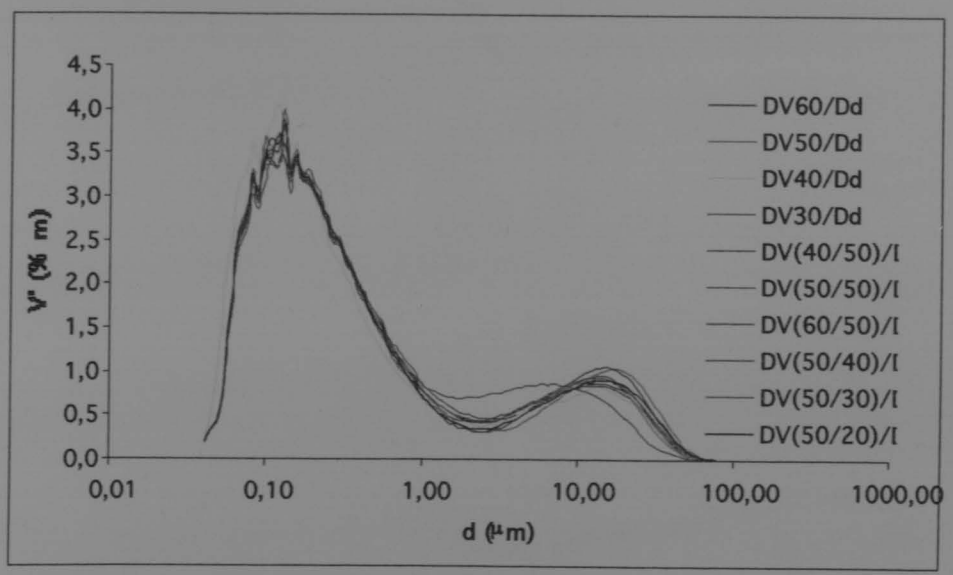


Figura 112 – Derivada da distribuição cumulativa, com e sem recirculação, à entrada

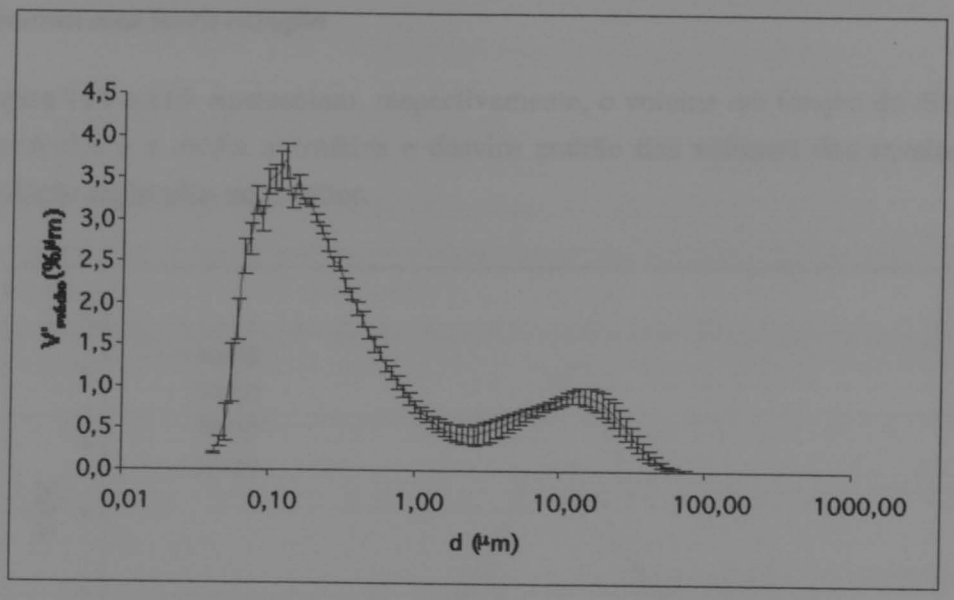


Figura 113 – Média aritmética e desvio padrão dos dados da Figura 112

Os gráficos acima confirmam a bimodalidade anteriormente referida aquando da análise isolada das curvas de distribuição e a fraca dispersão dos dados à entrada do ciclone.

Saída do Sistema

- **Sistema sem Recirculação**

As Figura 114 e 115 apresentam, respectivamente, o volume em função do diâmetro das partículas e a média aritmética e desvios padrão dos volumes dos ensaios sem recirculação registados no Coulter.

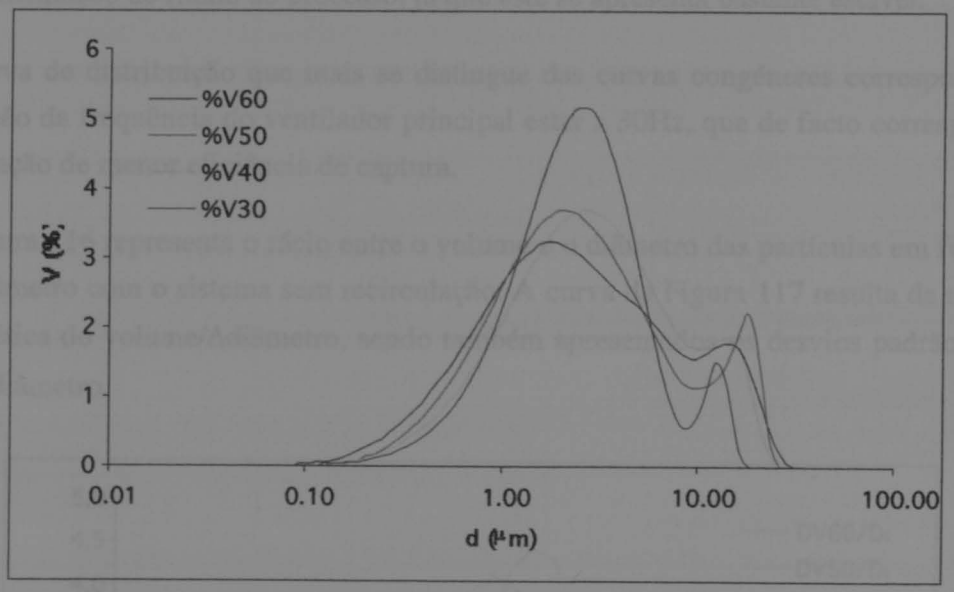


Figura 114 – Distribuição em volume, sem recirculação, à saída

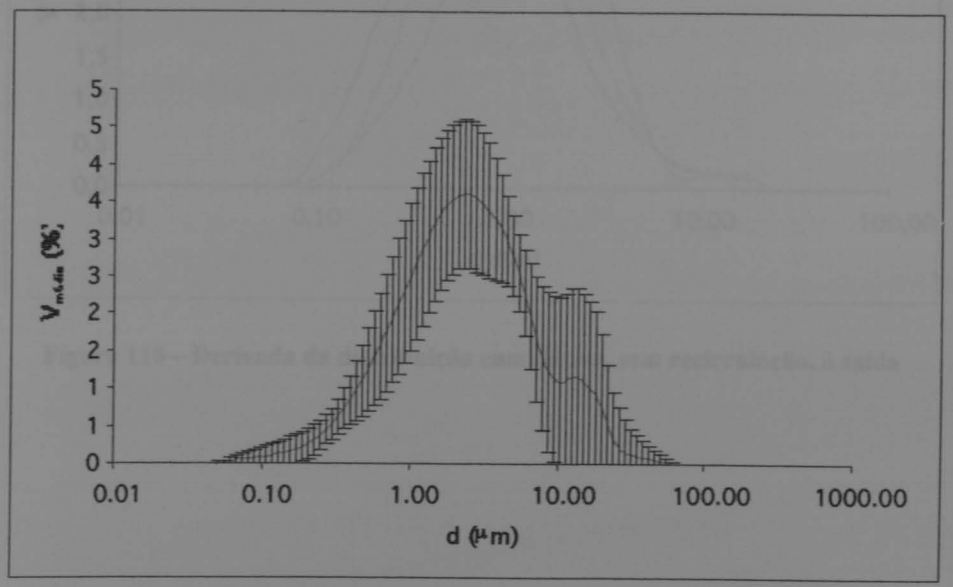


Figura 115 – Média aritmética e desvio padrão dos dados da Figura 114

Do mesmo modo que em análises efectuadas anteriormente, observa-se nas Figuras 114 e 115 a predominância de partículas de dois tamanhos distintos, localizando-se os máximos a 2 e 15μm, aproximadamente.

A distribuição bimodal de tamanhos nos diferentes casos apresenta uma dispersão elevada, pressupondo-se que à saída a frequência de partículas dependa das condições operatórias, nomeadamente do caudal. Esta dispersão não é ocasionada por diferenças na alimentação de fluído ao processo, já que este se apresenta bastante estável.

A curva de distribuição que mais se distingue das curvas congéneres corresponde à situação da frequência do ventilador principal estar a 30Hz, que de facto corresponde à situação de menor eficiência de captura.

A Figura 116 representa o rácio entre o volume e o diâmetro das partículas em função do diâmetro com o sistema sem recirculação. A curva da Figura 117 resulta da média aritmética do volume/Δdiâmetro, sendo também apresentados os desvios padrão para cada diâmetro.

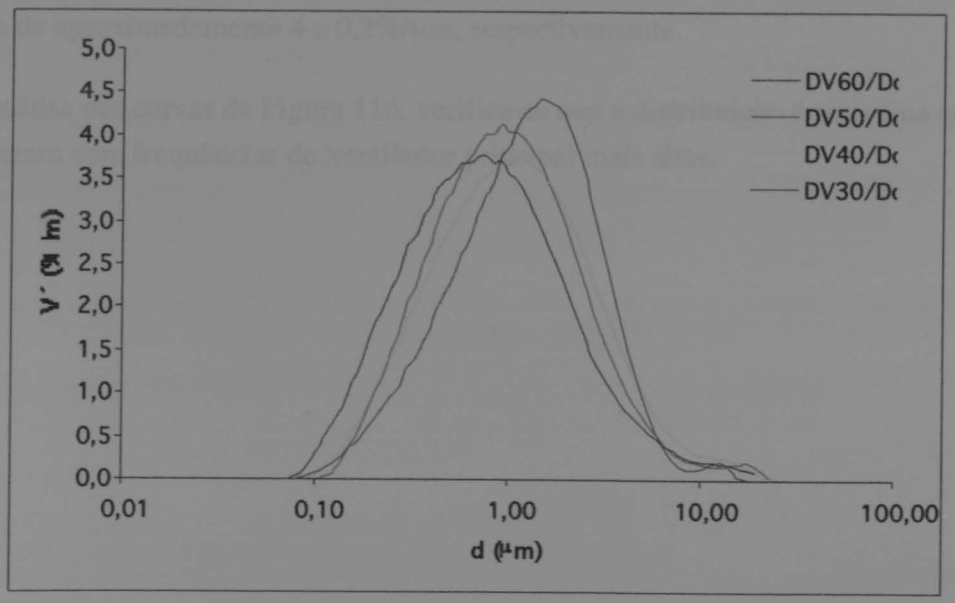


Figura 116 – Derivada da distribuição cumulativa, sem recirculação, à saída

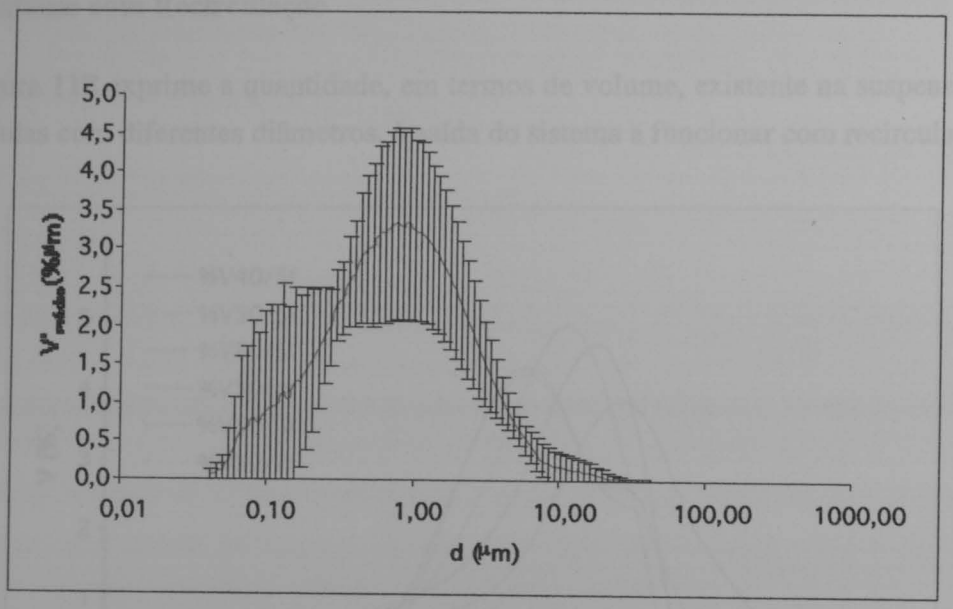


Figura 117 – Média aritmética e desvio padrão dos dados da Figura 116

Em termos absolutos, a quantidade de partículas de diâmetro médio de 2µm é maior do que a de 15µm, uma vez que o razão volume/Δd é substancialmente mais elevada, sendo de aproximadamente 4 e 0,2%/µm, respectivamente.

Por análise das curvas da Figura 116, verifica-se que a distribuição é mais fina quando se operam com frequências do ventilador principal mais altas.

- **Sistema com Recirculação**

A Figura 118 exprime a quantidade, em termos de volume, existente na suspensão de partículas com diferentes diâmetros, à saída do sistema a funcionar com recirculador.

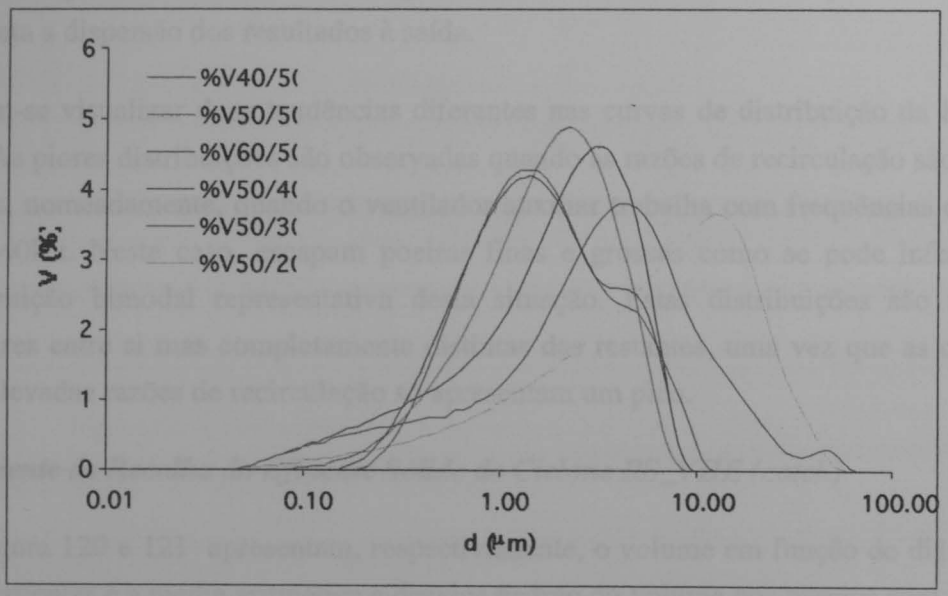


Figura 118 – Distribuição em volume, com recirculação, à saída

As curvas da Figura 119 representam o volume/Δdiâmetro como função do diâmetro das partículas para o sistema com recirculação.

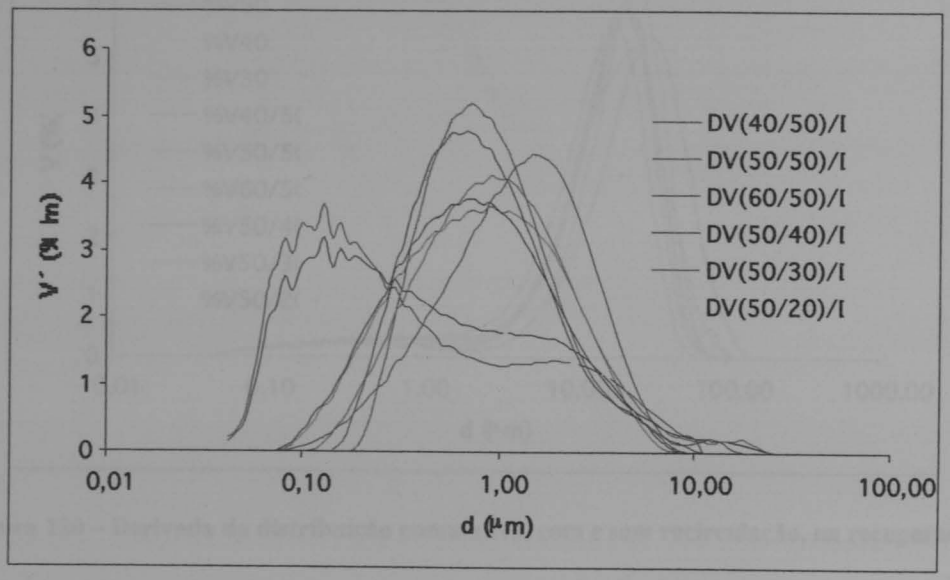


Figura 119 – Derivada da distribuição cumulativa, com recirculação, à saída

BIBLIOTECA F.E. PORTO

A performance do ciclone RS_VHE é aferida fundamentalmente pela análise das distribuições à saída e não das distribuições no pó removido pelo ciclone. Isto é devido à elevada eficiência da unidade processual em estudo.

Como se pode verificar, a introdução de um caudal de recirculação no ciclone aumenta a dispersão dos resultados à saída.

Podem-se visualizar duas tendências diferentes nas curvas de distribuição da Figura 119. As piores distribuições são observadas quando as razões de recirculação são mais baixas, nomeadamente, quando o ventilador auxiliar trabalha com frequências de 20, 30 e 40Hz. Neste caso, escapam poeiras finas e grossas como se pode inferir da distribuição bimodal representativa desta situação. Estas distribuições são muito similares entre si mas completamente distintas das restantes, uma vez que as curvas para elevadas razões de recirculação só apresentam um pico.

***Recipiente de Recolha do Efluente Sólido do Ciclone RS_VHE** (catch)*

As Figura 120 e 121 apresentam, respectivamente, o volume em função do diâmetro das partículas e a média aritmética e desvios padrão do volume nos ensaios com e sem recirculação, recolhidos no colector do ciclone RS_VHE.

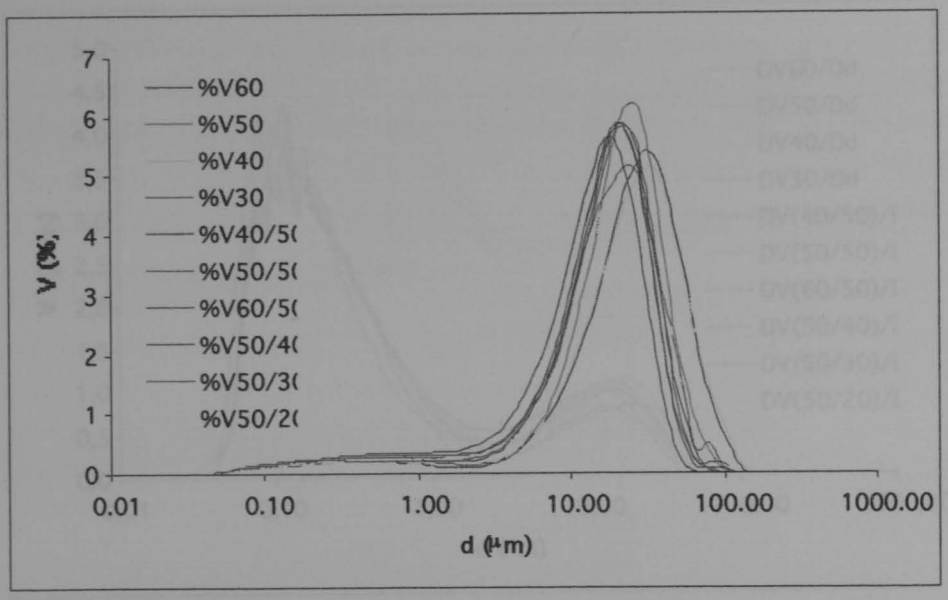


Figura 120 – Derivada da distribuição cumulativa, com e sem recirculação, na recuperação

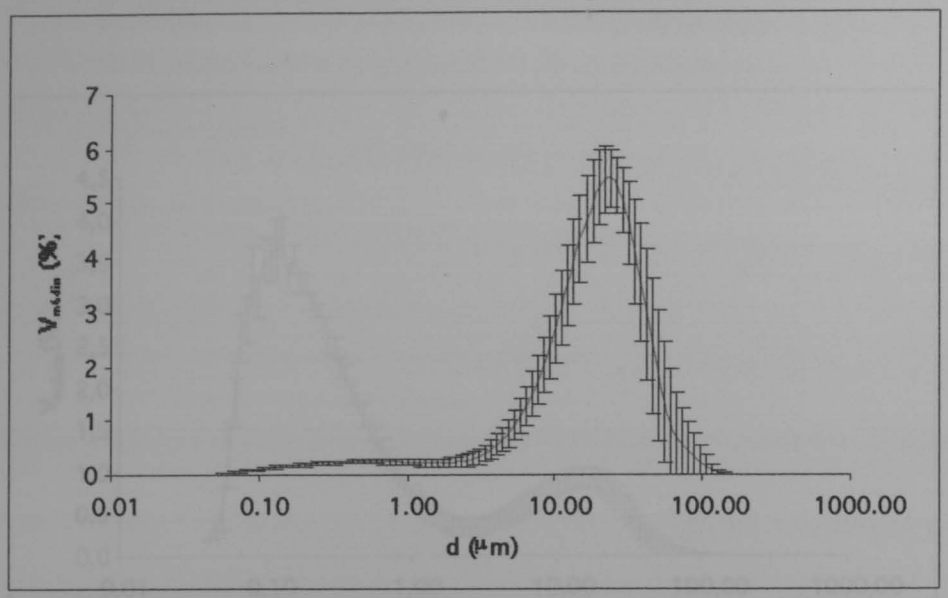


Figura 121 – Média aritmética e desvio padrão dos dados da Figura 120

As Figura 122 e 123 representam, respectivamente, o volume/Δdiâmetro em função do diâmetro das partículas e a média aritmética e desvio padrão da razão volume/Δdiâmetro nos ensaios realizados com e sem recirculação em amostras retiradas do recipiente colector do ciclone RS_VHE.

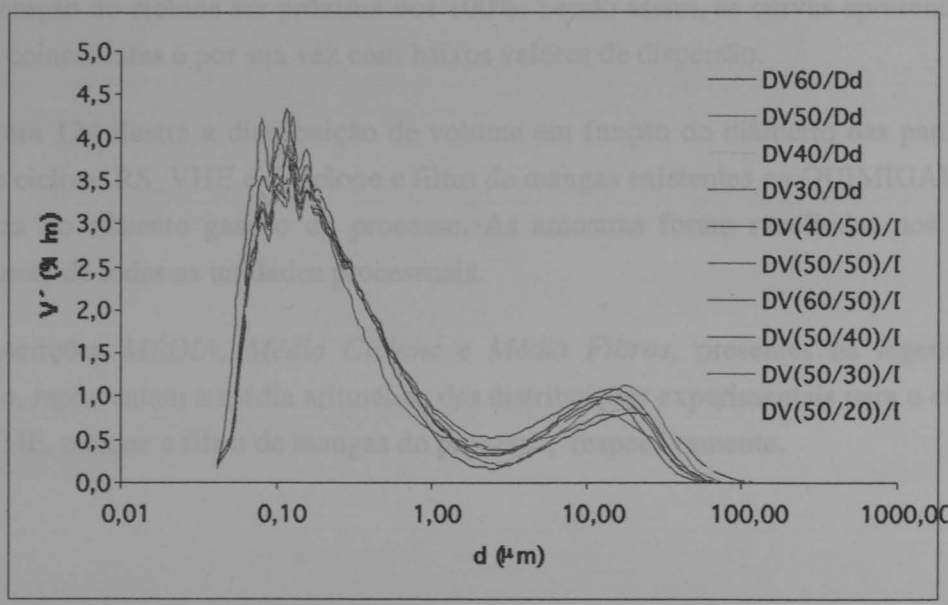


Figura 122 – Derivada da distribuição cumulativa, com e sem recirculação, na recuperação

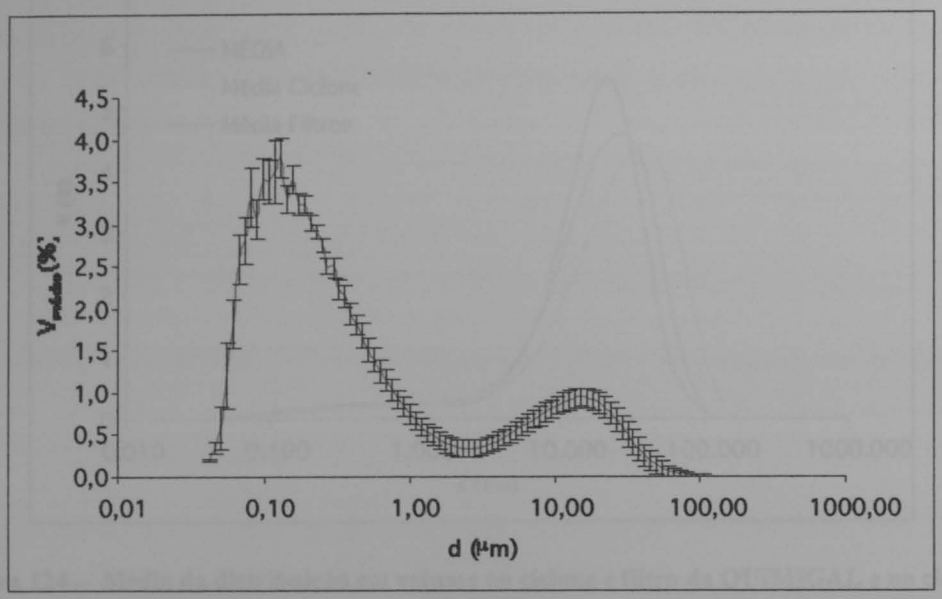


Figura 123 – Média aritmética e desvio padrão dos dados da Figura 122

A bimodalidade das distribuições no *catch* é consequência da alimentação de partículas ao ciclone. Aliás as distribuições na entrada e no recipiente colector são similares, pois quase todo o pó introduzido no sistema é removido, visto a eficiência de operação do ciclone ser próxima dos 100%. Sendo assim, as curvas apresentam-se quase coincidentes e por sua vez com baixos valores de dispersão.

A Figura 124 ilustra a distribuição de volume em função do diâmetro das partículas para o ciclone RS_VHE e o ciclone e filtro de mangas existentes na QUIMIGAL para limpeza do efluente gasoso do processo. As amostras foram recolhidas nos vasos colectores de todas as unidades processuais.

As inscrições *MÉDIA*, *Média Ciclone* e *Média Filtros*, presentes na legenda do gráfico, representam a média aritmética das distribuições experimentais para o ciclone RS_VHE, ciclone e filtro de mangas do processo, respectivamente.

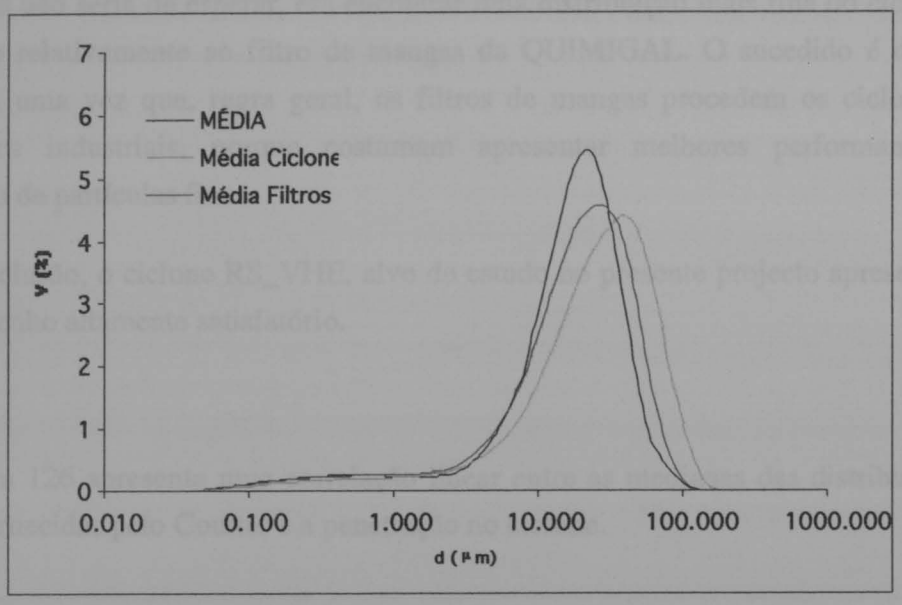


Figura 124 – Média da distribuição em volume no ciclone e filtro da QUIMIGAL e no ciclone RS_VHE

A Figura 125 foi elaborada de um modo similar à Figura 124, substituindo-se as abcissas pela razão volume/Δdiâmetro.

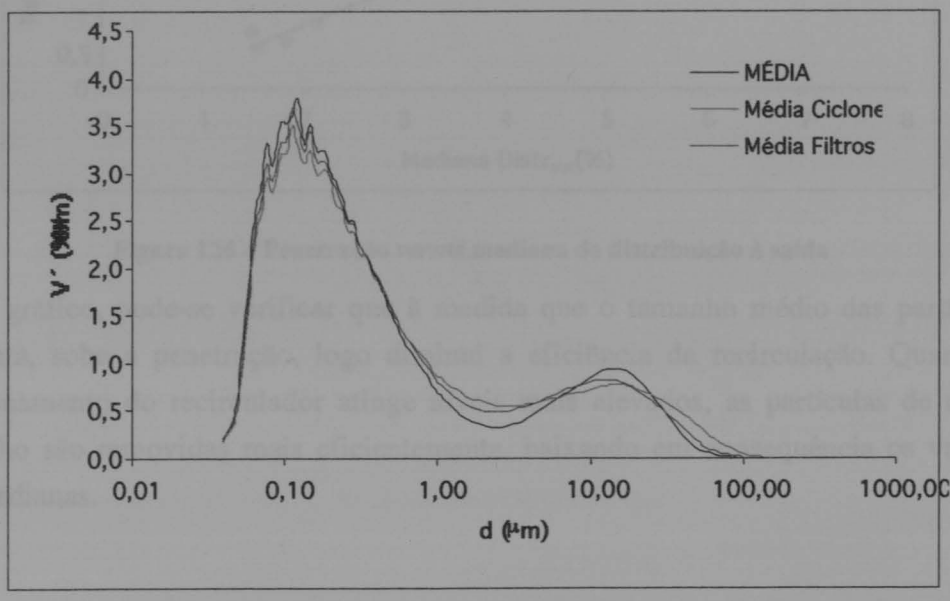


Figura 125 – Média da derivada da distribuição cumulativa no ciclone e filtro da QUIMIGAL e no ciclone RS_VHE

Comparando o ciclone RS_VHE com o ciclone de limpeza do efluente gasoso proveniente do processo de produção de ácido sulfanílico, concluímos que a distribuição é mais fina no primeiro caso. Sendo assim, o ciclone RS_VHE opera de um modo mais eficaz na remoção de poeiras de baixos diâmetros.

O que já não seria de esperar, era encontrar uma distribuição mais fina do ciclone do projecto relativamente ao filtro de mangas da QUIMIGAL. O sucedido é de facto notável, uma vez que, regra geral, os filtros de mangas procedem os ciclones em processos industriais, porque costumam apresentar melhores performances na remoção de partículas finas.

Em conclusão, o ciclone RS_VHE, alvo de estudo no presente projecto apresenta um desempenho altamente satisfatório.

A Figura 126 apresenta uma correlação linear entre as medianas das distribuições à saída fornecidas pelo Coulter e a penetração no ciclone.

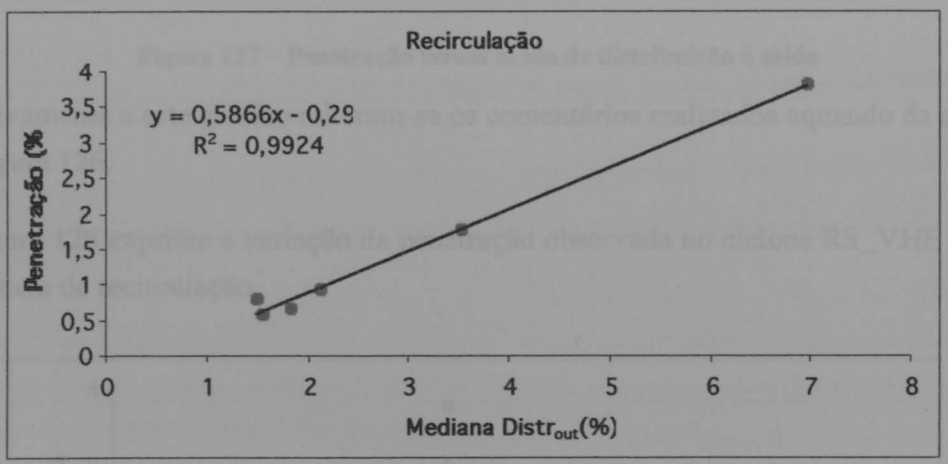


Figura 126 – Penetração *versus* mediana de distribuição à saída

Neste gráfico, pode-se verificar que à medida que o tamanho médio das partículas aumenta, sobe a penetração, logo diminui a eficiência de recirculação. Quando o funcionamento do recirculador atinge níveis mais elevados, as partículas de maior tamanho são removidas mais eficientemente, baixando em consequência os valores das medianas.

A Figura 127 foi obtida de uma forma semelhante à anterior e representa a penetração em função da moda das distribuições à saída.

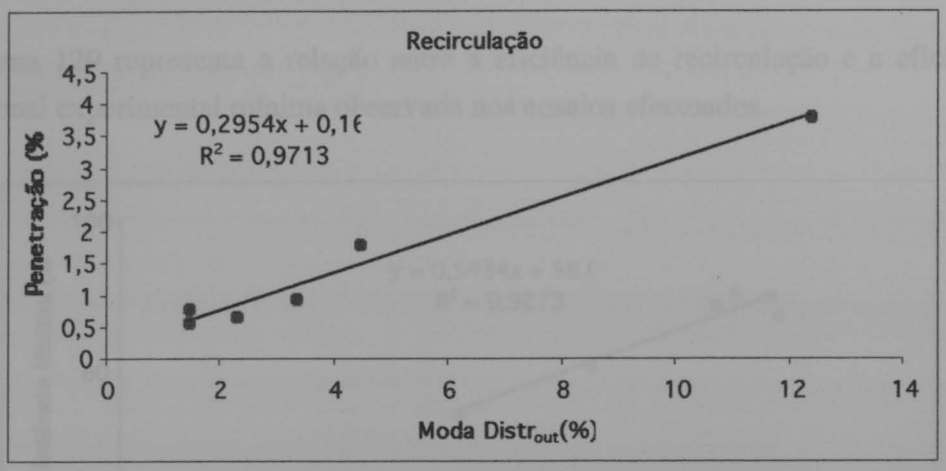


Figura 127 – Penetração *versus* moda de distribuição à saída

Relativamente a este gráfico reiteram-se os comentários realizados aquando da análise da Figura 126.

A Figura 128 exprime a variação da penetração observada no ciclone RS_VHE com a eficiência de recirculação.

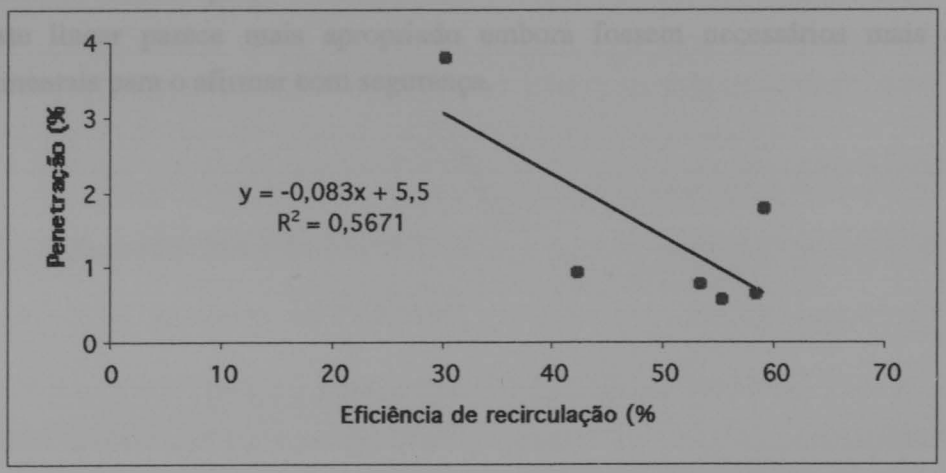


Figura 128 – Penetração *versus* eficiência de recirculação

Como se pode observar, no extremo inferior do gráfico existe uma dispersão acentuada, sendo possível considerar uma penetração aproximadamente constante para altos valores de eficiência de recirculação. Tentou-se ajustar uma equação de 1ª ordem aos dados do gráfico mas, quer por inspecção visual, quer pelo baixo valor do coeficiente de correlação, se conclui que o ajuste linear não é apropriado a esta situação.

A dispersão observada pode resultar de um estreitamento da escala das ordenadas, pois repare-se que para esta ordem de valores os erros experimentais tem um peso significativo.

A Figura 129 representa a relação entre a eficiência de recirculação e a eficiência fraccional experimental mínima observada nos ensaios efectuados.

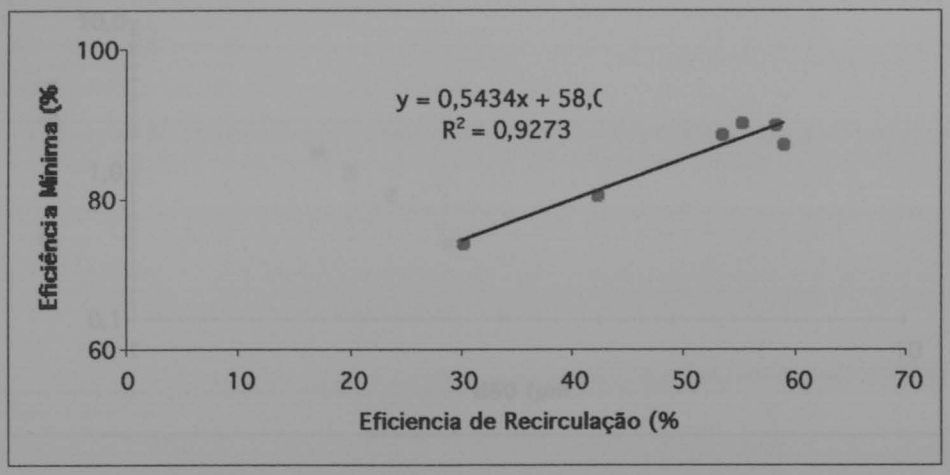


Figura 129 – Eficiência mínima *versus* eficiência de recirculação

Como seria de esperar, uma vez que a penetração diminui com o aumento da eficiência da recirculação, então a eficiência mínima do ciclone aumenta. Neste caso, o ajuste linear parece mais apropriado embora fossem necessários mais dados experimentais para o afirmar com segurança.

A Figura 130 apresenta a queda de pressão no ciclone para o sistema a funcionar sem recirculação em função do diâmetro de corte teórico. Define-se como diâmetro de corte - **d50** - o diâmetro das partículas para o qual a eficiência teórica, recorrendo neste caso ao modelo de Mothes e Loffler, é de 50%. Não é possível obter neste caso o d50 experimental, pois todas as eficiências fraccionais são superiores a 50%.

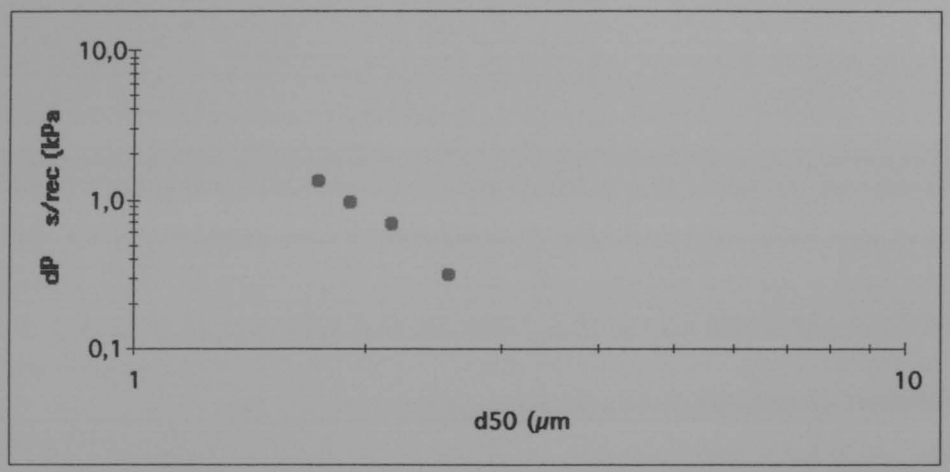


Figura 130 – Quedas de pressão, sem recirculação, *versus* diâmetro de corte

O estudo dos diâmetros de corte nestas unidades processuais reveste-se de especial interesse, uma vez que para uma mesma queda de pressão quanto menor for o d50 se conclui que é maior a eficiência do ciclone.

Por análise da Figura 130, verifica-se que os valores de d50 rondam os 2μm, numa gama de quedas de pressão desde 0,2 a 1,1kPa, aproximadamente.

1.1. Referências Bibliográficas

1 – A. Burnicore, W. Davis, *Air Pollution Engineering Manual*, **1992**.

2 – R. Salcedo, M Cândido, Global *Optimization of Reverse-Flow Gas Cyclones*, Separation Science and Technology, **2001** (*in press*).

3 – N. Cheremisionoff, Mixed-Flow Hydrodynamics, **1996**.

4 – A. Fonseca, R. Salcedo, *Grade-Efficiencies and Practice Size Distribution from Sampling Cyclones*, pp 539-561, **1996**.

5 – R. Salcedo, M.Coelho, *Turbulent Dispersion Coefficients in Cyclone Flow: An Empirical Approach*, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol 77, pp 609-617, **1999**.

6 CONCLUSÕES

A tarefa de desenvolver e implementar uma instalação à escala piloto, bem como de avaliar a performance do ciclone RS_VHE, a funcionar sem e com recirculação parcial, foi conseguida com sucesso. O desempenho desta unidade processual à escala laboratorial, anteriormente estudado, apresentou resultados notáveis quanto à eficiência de remoção de partículas. A análise efectuada neste relatório confirma, agora à escala piloto, a elevada eficácia do ciclone, operando isoladamente ou em conjunto com o recirculador, na captura de poeiras de tamanho reduzido.

A Secção Aspectos Gerais aborda o tema do tratamento de efluentes gasosos contendo partículas e refere as principais tecnologias para este fim. Uma vez que o projecto se centra na remoção de partículas finas, faz-se uma menção especial a este assunto de forma a introduzir os conceitos básicos sobre ciclones de alta eficiência e sistemas com recirculação.

Na Secção Descrição do Projecto descreve-se sumariamente o projecto encetado, justificando a sua existência e viabilidade económica. Assim, uma elevada eficiência na remoção de partículas finas associada a um baixo preço de aquisição fariam do ciclone RS_VHE uma unidade atractiva para as empresas com menos recursos. A opção por este tipo de ciclone em detrimento de tecnologias mais dispendiosas, nomeadamente filtros de mangas, seria indubitavelmente o caso de maior impacto económico.

Na Secção Descrição da Instalação Piloto apresenta-se o diagrama de processo da instalação piloto inserido na fábrica de ácido sulfanílico da QUIMIGAL, salientando-se os instrumentos de medição, uma vez que estamos perante um trabalho experimental. Esta última parte descreve sumariamente os aparelhos de medida bem como as técnicas de amostragem utilizadas.

Na Secção Resultados apresentam-se detalhadamente os resultados decorrentes do trabalho de campo realizado, que consistiu na determinação de parâmetros (pressão, temperatura e humidade) e caracterização do regime de transporte do fluído, através da construção de perfis de velocidade. Por análise destes perfis concluiu-se que, na generalidade, podemos considerar a velocidade do gás homogénea e facilitar deste modo a amostragem isocinética.

Todo o trabalho experimental foi realizado perseguindo o objectivo de determinar as eficiências, quer globais, quer fraccionais, no ciclone RS_VHE. Os altos valores de

BIBLIOTECA F.E. PORTO

eficiências globais encontrados, indicam que estamos na presença de um sistema de separação de fases muito poderoso. Esta característica aliada ao facto de operar com quedas de pressão muito baixas torna-o viável para implementação em processos industriais.

As eficiências fraccionais mostram que o ciclone RS_VHE funciona eficazmente na remoção de poeiras de baixos diâmetros, tendo-se obtido nos ensaios com recirculação uma distribuição de partículas ainda mais fina do que no filtro de mangas da QUIMIGAL. O sucedido é digno de realce, visto que, regra geral, os filtros de mangas sucedem os ciclones em processos industriais, devido a apresentarem melhores performances na remoção de partículas de pequeno tamanho. As emissões do filtro de mangas são semelhantes quer às do ciclone RS_VHE operando isoladamente, quer operando em conjunto com o concentrador.

Em conclusão, o ciclone RS_VHE, alvo de estudo do presente projecto, apresenta um desempenho altamente satisfatório nas condições operatórias do processo de produção de ácido sulfanílico. Estudos adicionais com o intuito de comparar o desempenho deste ciclone com ciclones actualmente comercializados, sob as mesmas condições operatórias, poderão dissipar quaisquer dúvidas remanescentes a este respeito.

7 ANEXO A – CONCEITOS BÁSICOS SOBRE AMOSTRAGEM ISOCINÉTICA

Seguidamente apresenta-se uma listagem de definições importantes para a compreensão do processo de amostragem isocinética:

- **Partículas ou pó** – partículas sólidas de diferentes formas, estrutura ou densidade, nas condições do ponto de amostragem, suspensas na fase gasosa;
- **Temperatura de filtração** – temperatura obtida a jusante do filtro;
- **Filtração do gás recolhido** – no processo de filtração os filtros são colocados imediatamente a seguir à ponteira de sonda;
- **Amostragem isocinética** – tipicamente efectua-se a amostragem a caudais que permitam que o gás recolhido tenha a mesma direcção e velocidade no aparelho de recolha da amostra e no ponto de amostragem na tubagem do processo;
- **Diâmetro hidráulico** – a dimensão característica da secção recta da conduta de gás é definida por:

$$d_h = \frac{4 \cdot Área\ \ da\ \ Secção\ \ \mathrm{Re}cta}{Perímetro\ \ da\ \ Secção\ \ \mathrm{Re}cta} \qquad (1)$$

- **Plano de amostragem** – o plano de amostragem é perpendicular à conduta;
- **Linha de amostragem** – a linha sobre a qual os pontos de amostragem estão localizados;
- **Ponto de amostragem** – posição específica na linha de amostragem onde a amostra é extraída;
- **Condições padrão** – as condições de amostragem podem variar de acordo com o processo que está a ser monitorizado. Para a Europa os valores típicos de pressão e temperatura para gás seco são: 101,325kPa e 273,15K, respectivamente;
- **Realização do branco** – a amostra é recolhida na instalação fabril de uma forma idêntica à utilizada nas recolhas normais, excepto na sua duração que é encurtada para períodos inferiores a um minuto ou na sucção de gás que não é efectuada durante a duração do teste. Os são realizados com o objectivo de atestar a

qualidade do processo de amostragem e incluem as componentes: filtro e ponteira de sonda;

- **Controlo na pesagem** – as medições de pesagem antes e após a recolha de pó devem ser efectuadas sob as mesmas condições de humidade, e para tal deve-se usar um excicador.

8 ANEXO B – RELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE E CONCENTRAÇÃO NO MONITOR DE CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS FW 56-I

A relação entre intensidade transmitida pelo monitor de concentração de pó e a concentração à entrada do sistema é expressa por uma equação quadrática e é possível de se visualizar na Figura 131.

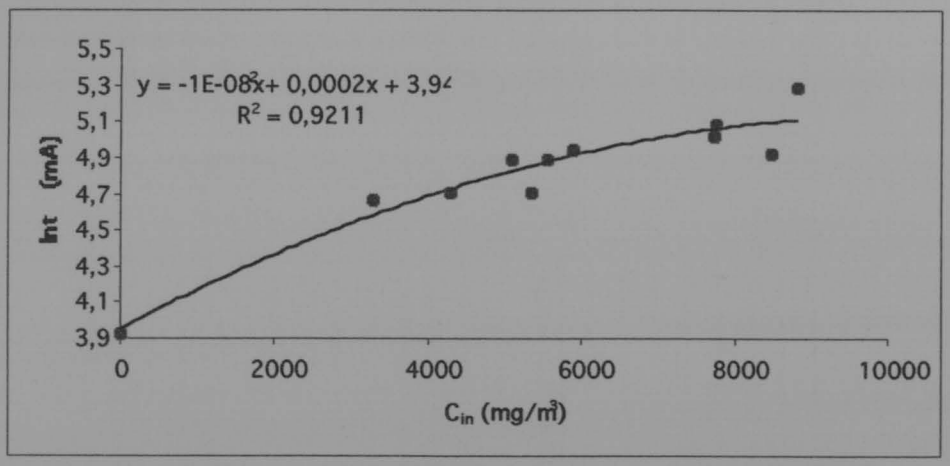


Figura 131 – Concentração *versus* intensidade à entrada no sistema

À saída, a relação entre intensidade e concentração já não pode ser exprimida por uma expressão do mesmo tipo, uma vez que provavelmente os pontos se encontram abaixo do limite de sensibilidade do aparelho e estão sujeitos a um erro na medição elevado (Figura 132).

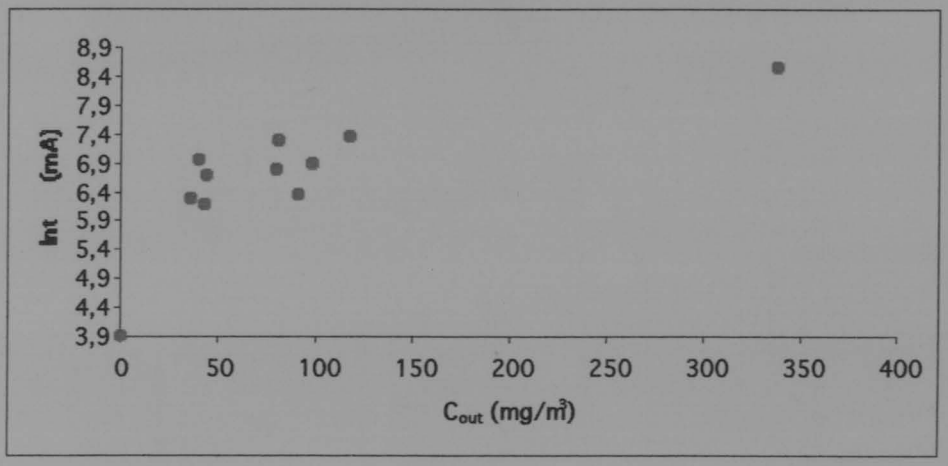


Figura 132 – Concentração *versus* intensidade à saída

9 ANEXO C – DADOS PARA A DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES

De seguida apresentam-se os dados experimentais recolhidos aquando da caracterização do regime de transporte de fluido nas condutas da fábrica de ácido sulfanílico da QUIMIGAL.

f main = Hz	**30**
f auxil = Hz	**0**
DP cicl= kPa	0.30-0.31
DP total= kPa	0,45

Condições do Processo

Flame signal mA =	86-90
Inlet controler = °C	216-220
Outlet controler = °C	88-90

Entrada

T = °C	79,5
H =	11,2
P abs = kPa	999,42
d = g/m3	969,6
extinção =	0,157
intensidade = mA	5,47

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	0,80
23,8	0,91
22,8	0,98
21,8	1,05
20,8	1,08
19,8	1,18
18,8	1,15
17,8	1,22
16,8	1,20
15,8	1,20
14,8	1,18
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

Condições do Processo

Flame signal mA =	
Inlet controler = °C	
Outlet controler = °C	

Intermédia

T = °C	
H =	
P abs = kPa	
d = g/m3	
extinção =	
intensidade = mA	

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	
23,8	
22,8	
21,8	
20,8	
19,8	
18,8	
17,8	
16,8	
15,8	
14,8	
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

Condições do Processo

Flame signal mA =	86-90
Inlet controler = °C	216-220
Outlet controler = °C	88-90

Saída

T = °C	60,6
H =	20,9
P abs = kPa	1003,93
d = g/m3	1032,7
extinção =	0,476
intensidade = mA	8,78

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	0,68
23,8	0,94
22,8	0,98
21,8	0,96
20,8	0,97
19,8	0,94
18,8	0,93
17,8	0,93
16,8	0,96
15,8	0,93
14,8	0,90
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

f main = Hz	**40**
f auxil = Hz	**0**
DP cicl= kPa	0,68
DP total= kPa	0,93

Condições do Processo

Flame signal mA =	62-64
Inlet controler = °C	187-220
Outlet controler = °C	92-90

Entrada

T = °C	73
H =	10,7
P abs = kPa	996,37
d = g/m3	989,8
extinção =	0,171
intensidade = mA	5,67

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	1,61
23,8	1,76
22,8	1,86
21,8	2,03
20,8	2,21
19,8	2,23
18,8	2,26
17,8	1,81
16,8	1,92
15,8	1,88
14,8	1,89
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

Condições do Processo

Flame signal mA =	
Inlet controler = °C	
Outlet controler = °C	

Intermédia

T = °C	
H =	
P abs = kPa	
d = g/m3	
extinção =	
intensidade = mA	

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	
23,8	
22,8	
21,8	
20,8	
19,8	
18,8	
17,8	
16,8	
15,8	
14,8	
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

Condições do Processo

Flame signal mA =	60-65
Inlet controler = °C	202-220
Outlet controler = °C	91-90

Saída

T = °C	60,7
H =	15,3
P abs = kPa	1004,04
d = g/m3	1036,7
extinção =	0,378
intensidade = mA	7,9

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	1,34
23,8	1,75
22,8	1,77
21,8	1,75
20,8	1,72
19,8	1,69
18,8	1,70
17,8	1,70
16,8	1,67
15,8	1,71
14,8	1,64
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

f main = Hz	**50**
f auxil = Hz	**0**
DP cicl= kPa	0,94-0,96
DP total= kPa	1,28-1,30
Condições do Processo	
Flame signal mA =	60-70
Inlet controler = ºC	180-220
Outlet controler = ºC	88-90
Hora =	
Entrada	
T = ºC	78,2
H =	11,7
P abs = kPa	993,17
d = g/m3	967,2
extinção =	0,305
intensidade = mA	7,42

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	2,27
23,8	2,57
22,8	2,76
21,8	3,06
20,8	3,08
19,8	3,16
18,8	3,24
17,8	3,02
16,8	3,03
15,8	2,94
14,8	2,81
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

Condições do Processo	
Flame signal mA =	
Inlet controler = ºC	
Outlet controler = ºC	
Hora =	
Intermédia	
T = ºC	
H =	
P abs = kPa	
d = g/m3	
extinção =	
intensidade = mA	

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	
23,8	
22,8	
21,8	
20,8	
19,8	
18,8	
17,8	
16,8	
15,8	
14,8	
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

Condições do Processo	
Flame signal mA =	90
Inlet controler = ºC	180-220
Outlet controler = ºC	90-90
Hora =	
Saída	
T = ºC	68,4
H =	15,6
P abs = kPa	1004,89
d = g/m3	1009,2
extinção =	0,504
intensidade = mA	9,44

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	2,10
23,8	2,83
22,8	2,90
21,8	2,84
20,8	2,80
19,8	2,77
18,8	2,77
17,8	2,70
16,8	2,75
15,8	2,79
14,8	2,72
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

f main = Hz	**60**
f auxil = Hz	**0**
DP cicl= kPa	1,32
DP total= kPa	1.91-1.90

Condições do Processo

Flame signal mA =	80-90
Inlet controler = °C	211-220
Outlet controler = °C	88-90

Entrada

T = °C	78,3
H =	10,7
P abs = hPa	990,88
d = g/m3	966,1
extinção =	0,238
intensidade = mA	6,50

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	3,23
23,8	3,50
22,8	3,75
21,8	4,04
20,8	4,04
19,8	4,19
18,8	4,21
17,8	4,19
16,8	3,91
15,8	3,86
14,8	3,67
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

Condições do Processo

Flame signal mA =	
Inlet controler = °C	
Outlet controler = °C	

Intermédia

T = °C	
H =	
P abs = hPa	
d = g/m3	
extinção =	
intensidade = mA	

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	
23,8	
22,8	
21,8	
20,8	
19,8	
18,8	
17,8	
16,8	
15,8	
14,8	
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

Condições do Processo

Flame signal mA =	78-82
Inlet controler = °C	176-220
Outlet controler = °C	88-90

Saída

T = °C	73,3
H =	11,9
P abs = hPa	1007,13
d = g/m3	998,1
extinção =	0,548
intensidade = mA	9,92

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	3,05
23,8	4,09
22,8	4,20
21,8	4,17
20,8	4,11
19,8	4,05
18,8	4,03
17,8	4,01
16,8	4,05
15,8	3,99
14,8	3,89
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

f main = Hz	**50**
f auxil = Hz	**20**
DP cicl= kPa	0.92-0.94
DP total= kPa	1.27-1.29

Condições do Processo

Flame signal mA =	69-71
Inlet controler = ºC	182-220
Outlet controler = ºC	80-90

Entrada

T = ºC	74,9
H =	11,7
P abs = hPa	992,71
d = g/m3	978,3
extinção =	0,2018
intensidade = mA	6,1533

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	2,82
23,8	2,99
22,8	3,23
21,8	3,50
20,8	3,60
19,8	3,83
18,8	3,77
17,8	3,70
16,8	3,59
15,8	3,51
14,8	3,29
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

Condições do Processo

Flame signal mA =	86-90
Inlet controler = ºC	192-220
Outlet controler = ºC	89-90

Intermédio

T = ºC	61,3
H =	17,7
P abs = hPa	982,34
d = g/m3	1010
extinção =	-
intensidade = mA	-

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	0,11
23,8	0,16
22,8	0,38
21,8	0,26
20,8	0,20
19,8	0,30
18,8	0,34
17,8	0,26
16,8	0,22
15,8	0,23
14,8	0,18
13,8	0,12
12,8	0,14
11,8	0,13
10,8	0,20
9,8	0,19

Condições do Processo

Flame signal mA =	80-90
Inlet controler = ºC	216-220
Outlet controler = ºC	88-90

Saída

T = ºC	68,5
H =	15,1
P abs = hPa	1006,43
d = g/m3	1010,9
extinção =	0,7478
intensidade = mA	11,976

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	2,63
23,8	3,29
22,8	3,41
21,8	3,39
20,8	3,35
19,8	3,29
18,8	3,34
17,8	3,27
16,8	3,25
15,8	3,28
14,8	3,14
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

f main = Hz	**50**
f auxil = Hz	**30**
DP cicl= kPa	0.92-0.94
DP total= kPa	1.27-1.29

Condições do Processo

Flame signal mA =	69-71
Inlet controler = °C	182-220
Outlet controler = °C	80-90

Entrada

T = °C	70,6
H =	13,5
P abs = hPa	994,23
d = g/m3	992,7
extinção =	0,1793
intensidade = mA	5,8533

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	2,36
23,8	2,71
22,8	3,21
21,8	3,31
20,8	3,41
19,8	3,35
18,8	3,42
17,8	3,28
16,8	3,20
15,8	3,12
14,8	2,92
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

Condições do Processo

Flame signal mA =	86-90
Inlet controler = °C	192-220
Outlet controler = °C	89-90

Intermédio

T = °C	42,6
H =	28,2
P abs = hPa	982,05
d = g/m3	1074,9
extinção =	-
intensidade = mA	-

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	0,12
23,8	0,15
22,8	0,20
21,8	0,17
20,8	0,15
19,8	0,13
18,8	0,13
17,8	0,11
16,8	0,12
15,8	0,11
14,8	0,08
13,8	0,06
12,8	0,05
11,8	0,09
10,8	0,09
9,8	0,00

Condições do Processo

Flame signal mA =	80-90
Inlet controler = °C	216-220
Outlet controler = °C	88-90

Saída

T = °C	69,3
H =	14,5
P abs = hPa	1005,82
d = g/m3	1008
extinção =	0,4433
intensidade = mA	8,67

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	2,08
23,8	2,80
22,8	2,92
21,8	2,93
20,8	2,91
19,8	2,87
18,8	2,89
17,8	2,85
16,8	2,87
15,8	2,86
14,8	2,84
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

f main = Hz	**50**
f auxil = Hz	**40**
DP cicl= kPa	1,34
DP total= kPa	1,7

Condições do Processo

Flame signal mA =	68-70
Inlet controler = °C	188-220
Outlet controler = °C	89-90

Entrada

T = °C	70,6
H =	13,5
P abs = kPa	996,74
d = g/m3	995,2
extinção =	0,161333333
intensidade = mA	5,673333333

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	1,24
23,8	1,52
22,8	1,58
21,8	2,12
20,8	2,17
19,8	1,97
18,8	1,95
17,8	1,94
16,8	1,85
15,8	1,77
14,8	1,62
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

Condições do Processo

Flame signal mA =	80-90
Inlet controler = °C	187-220
Outlet controler = °C	92-90

Intermédio

T = °C	58,9
H =	19,8
P abs = kPa	978,63
d = g/m3	1013,4
extinção =	-
intensidade = mA	-

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	0,33
23,8	0,27
22,8	0,27
21,8	0,29
20,8	0,30
19,8	0,32
18,8	0,30
17,8	0,29
16,8	0,29
15,8	0,34
14,8	0,26
13,8	0,24
12,8	0,24
11,8	0,22
10,8	0,22
9,8	0,19

Condições do Processo

Flame signal mA =	80-90
Inlet controler = °C	192-220
Outlet controler = °C	87-90

Saída

T = °C	63,7
H =	16,4
P abs = kPa	1005,19
d = g/m3	1026
extinção =	0,344
intensidade = mA	7,653333333

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	1,30
23,8	1,71
22,8	1,82
21,8	1,79
20,8	1,78
19,8	1,80
18,8	1,77
17,8	1,76
16,8	1,74
15,8	1,76
14,8	1,72
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

f main = Hz	**50**
f auxil = Hz	**50**
DP cicl= kPa	1,57-1,59
DP total= kPa	1,95-1,98

Condições do Processo

Flame signal mA =	80-90
Inlet controler = °C	198-220
Outlet controler = °C	88-90

Entrada

T = °C	78,2
H =	11,7
P abs = hPa	1000,16
d = g/m3	974,1
extinção =	0,247
intensidade = mA	6,53

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	0,61
23,8	0,92
22,8	1,05
21,8	1,23
20,8	1,31
19,8	1,32
18,8	1,24
17,8	1,19
16,8	1,31
15,8	1,31
14,8	1,30
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

Condições do Processo

Flame signal mA =	60-70
Inlet controler = °C	188-220
Outlet controler = °C	92-90

Intermédio

T = °C	62,4
H =	17,5
P abs = hPa	976,18
d = g/m3	999,8
extinção =	-
intensidade = mA	-

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	0,04
23,8	0,09
22,8	0,15
21,8	0,21
20,8	0,27
19,8	0,33
18,8	0,38
17,8	0,40
16,8	0,38
15,8	0,39
14,8	0,31
13,8	0,36
12,8	0,30
11,8	0,27
10,8	0,21
9,8	0,10

Condições do Processo

Flame signal mA =	90
Inlet controler = °C	173-220
Outlet controler = °C	88-90

Saída

T = °C	62,9
H =	17,3
P abs = hPa	1004,18
d = g/m3	1027,1
extinção =	0,424
intensidade = mA	8,28

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	0,80
23,8	1,03
22,8	1,09
21,8	1,13
20,8	1,14
19,8	1,14
18,8	1,16
17,8	1,15
16,8	1,14
15,8	1,14
14,8	1,11
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

f main = Hz	**40**
f auxil = Hz	**50**
DP cicl= kPa	1,40-1,42
DP total= kPa	1,69-1,71

Condições do Processo

Flame signal = mA	80
Inlet controler = °C	213-220
Outlet controler = °C	90-90

Entrada

T = °C	72,7
H =	12,6
P abs = kPa	1001,31
d = g/m3	993,5
extinção =	0,126
intensidade = mA	5,23

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	0,11
23,8	0,20
22,8	0,24
21,8	0,24
20,8	0,26
19,8	0,24
18,8	0,24
17,8	0,22
16,8	0,24
15,8	0,25
14,8	0,22
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

Condições do Processo

Flame signal = mA	70-72
Inlet controler = °C	188-220
Outlet controler = °C	90-91

Intermédio

T = °C	52,2
H =	19,1
P abs = kPa	982,58
d = g/m3	1042,8
extinção =	-
intensidade = mA	-

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	0,07
23,8	0,21
22,8	0,28
21,8	0,46
20,8	0,50
19,8	0,63
18,8	0,69
17,8	0,76
16,8	0,70
15,8	0,62
14,8	0,53
13,8	0,50
12,8	0,44
11,8	0,39
10,8	0,40
9,8	0,32

Condições do Processo

Flame signal = mA	60-65
Inlet controler = °C	202-220
Outlet controler = °C	91-90

Saída

T = °C	51,6
H =	22,1
P abs = kPa	1002,83
d = g/m3	1065,2
extinção =	0,303
intensidade = mA	7,12

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	0,16
23,8	0,26
22,8	0,26
21,8	0,28
20,8	0,28
19,8	0,29
18,8	0,25
17,8	0,27
16,8	0,29
15,8	0,29
14,8	0,27
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	

f main = Hz	**60**
f auxil = Hz	**50**
DP cicl= kPa	1,57-1,59
DP total= kPa	1,95-1,98

Condições do Processo

Flame signal mA =	80-90
Inlet controler = °C	198-220
Outlet controler = °C	88-90

Entrada

T = °C	80,4
H =	10,2
P abs = hPa	995,57
d = g/m3	964,4
extinção =	0,1987
intensidade = mA	6,144

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	2,11
23,8	2,33
22,8	2,47
21,8	2,59
20,8	2,79
19,8	2,67
18,8	2,69
17,8	2,70
16,8	2,71
15,8	2,62
14,8	2,65
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	



Condições do Processo

Flame signal mA =	60-70
Inlet controler = °C	188-220
Outlet controler = °C	92-90

Intermédio

T = °C	60,5
H =	18,9
P abs = hPa	969,42
d = g/m3	998,2
extinção =	-
intensidade = mA	-

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	0,21
23,8	0,25
22,8	0,30
21,8	0,41
20,8	0,43
19,8	0,46
18,8	0,46
17,8	0,46
16,8	0,44
15,8	0,42
14,8	0,42
13,8	0,41
12,8	0,37
11,8	0,33
10,8	0,31
9,8	0,28

Condições do Processo

Flame signal mA =	90
Inlet controler = °C	173-220
Outlet controler = °C	88-90

Saída

T = °C	68,4
H =	14,2
P abs = hPa	1005,19
d = g/m3	1010,9
extinção =	0,4425
intensidade = mA	8,72

distância= cm	d pressão = hPa
24,8	1,67
23,8	2,29
22,8	2,41
21,8	2,38
20,8	2,32
19,8	2,36
18,8	2,34
17,8	2,33
16,8	2,37
15,8	2,39
14,8	2,33
13,8	
12,8	
11,8	
10,8	
9,8	


FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO
BIBLIOTECA
0000088411