

Captura de Poeiras Finas com Ciclones de Recirculação Electrostática

Conceptualização, Modelização e Validação Experimental

Júlio José da Silva Paiva

Porto, Maio 2010

Captura de Poeiras Finas com Ciclones de Recirculação Electrostática

Conceptualização, Modelização e Validação Experimental

Júlio José da Silva Paiva

Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Química pela
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

FEUP

**Departamento de
Engenharia Química**

DEQ

tese realizada sob a orientação do

Professor Doutor Romualdo Luís Ribera Salcedo

Professor Catedrático da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
e co-orientação do

Doutor Paulo Alexandre Pereira de Araújo

Coordenador do Departamento de Tecnologia, Engenharia de Processos e Desenvolvimento da CUF - Químicos
Industriais, S.A.

*A todos os promotores
desta etapa na minha vida,
e ao INÍCIO
de uma nova etapa.*

Preâmbulo

Se no início do meu curso de licenciatura me fizessem a pergunta se um dia me via a ser um investigador, a minha resposta seria, “quero concluir a minha licenciatura e depois ingressar no mercado de trabalho, uma vez que não sinto que tenho perfil para ser investigador”.

Tendo concluído a minha licenciatura em Julho de 2006, fui candidato a uma bolsa de doutoramento com outros propósitos e numa área mais ligada à minha formação como aluno: reacção e modelização. Esta bolsa foi recusada e no final de Agosto de 2006 fiquei oficialmente no desemprego.

Em Setembro de 2006, através da conjugação de uma série de factores particulares, o Helder Gomes da Silva propôs o meu nome ao Professor Romualdo Salcedo como um potencial candidato para realizar o trabalho associado a este doutoramento. Assim sendo, fica aqui o meu agradecimento ao Helder por me ter ajudado a iniciar a minha carreira de investigador.

Claro está que esta carreira não tinha sido levada a este (esperemos que bom) porto sem a grande contribuição do meu orientador Professor Romualdo Salcedo em tornar esta relação de trabalho numa relação simbiótica, tendo-se esta tornado gradualmente numa relação também pessoal. Tenho a agradecer a frontalidade no apontar das minhas falhas, a capacidade de motivação quando eu estava menos motivado, a disponibilidade para todas as sessões de *brainstorming*, a liberdade de expressão quando estive em desacordo. É com muito orgulho que tive/tenho e espero continuar a ter uma relação com o Professor Romualdo Salcedo em que reajo como sinto e posso dizer “o que me vai na alma” sem quaisquer prejuízos na relação. Ficam as minhas palavras de agradecimento por tudo.

Há um agradecimento devido a todo o pessoal da CUF-Químicos Industriais, S.A., que sempre me acolheram bem e me deram as ferramentas de trabalho que precisei para analisar a situação da instalação industrial instalada na fábrica de produção de ácido sulfanílico. Fica aqui o particular agradecimento ao meu co-orientador Doutor Paulo Araújo pelas pessoas (certas) que me apresentou na fábrica de forma a tornar o meu trabalho mais simples. Quero ainda deixar aqui o meu obrigado à Catarina por me ter feito sentir que as dificuldades sentidas no início eram normais e que entretanto seriam superadas.

Gostaria de deixar aqui expresso o meu obrigado a todos os que se sentiram à vontade em entrarem na E219 e fazerem com que o local de trabalho também fosse brindado com um pouco de "coisas menos sérias". Assim sendo fica expresso o meu obrigado ao Professor Sebastião Feye de Azevedo, pelas conversas acerca de temas vários ao longo destes anos, ao Professor Fernando Martins pela preocupação em saber (de tempos a tempos) como andava o trabalho e à Professora Joana Peres, que durante as suas visitas se mostrava sempre com cara alegre e transmitia a sensação de que tudo iria "correr bem".

Aos "habitantes" da E219, tenho que deixar o meu profundo agradecimento! Particularmente ao Helder Gomes da Silva e ao Moritz von Stosch, uma vez que para além de companheiros na "labuta", foram Amigos em alturas críticas. Ao Helder, desejei-lhe tudo o que ele sabe que merece e ao "Stoschinho" que a vida lhe sorria com todos os dentes, e que ele escale os 100 picos que tanto quer escalar antes de morrer! Eu cá não tenho dúvidas que ele o faça!

De todas as outras pessoas que por lá passaram no decorrer do trabalho de doutoramento, e ainda que não tenhamos trabalhado em conjunto, quero deixar aqui expresso o meu obrigado ao Peter Ho pelos debates acerca de interesses comuns extra trabalho, ao Luís Paz por me ter mostrado sempre o que é saber estar e ter perseverança na obtenção das coisas que queremos, à Luísa Barreiros por me ter "patrocinado" belas conversas e por ter sido por diversas vezes o ouvido amigo que precisava e finalmente por me ter apresentado a Cátia, a Vera, a Rita, a Márcia e a Ivone "Tininha", que se vieram a revelar como belas companhias em tertúlias à hora de almoço e lanche.

A título pessoal, fica aqui o meu agradecimento à Rita Alves pela sua eterna "fórmula" de ser sinusoidal com uma constante que não outra que o sentimento de amizade, ao PEP e à Ema pela presença quando foi preciso esporear, assim como à Inês e ao Cacán, ao Sérgio e à Martha e a todos os outros que tiveram a capacidade de me fazer abstrair do doutoramento em alturas que de facto era preciso que tal acontecesse.

Em termos familiares, fica aqui o agradecimento aos meus pais e à Nanda por todas as condições que me deram (não só) durante o doutoramento. Quero no entanto destacar o meu irmão Jorge que sempre acreditou em mim e nas minhas capacidades e me motivou sempre na procura de mais.

Fica aqui expresso também o meu AMOR e a minha gratidão à Minha MARIA e por toda a paciência que foi preciso ter ao longo deste processo, e por ela nunca me ter faltado e por ter estado sempre lá com um sorriso e/ou uma lágrima para me ajudar a superar mais esta etapa.

Numa nota de boa disposição, fica aqui o meu agradecimento a quem mais trabalhou neste doutoramento. Ficam aqui referidos os computadores xenon1, xenon3 e x05.

O meu muito Obrigado a todos!!

Porto, 21 de Maio de 2010.



FCT

Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

Esta tese realizou-se sob financiamento de uma Bolsa de Doutoramento em Empresa, com a referência SFRH/BDE/15628/2006. Gostaria de agradecer o apoio financeiro atribuído pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia ao abrigo do Programa de Formação Avançada de Recursos Humanos assim como o apoio financeiro dado pela empresa co-financiadora CUF - Químicos Industriais, S.A..

Resumo

Esta tese tem como objectivo a conceptualização, modelização e validação experimental da captura de poeiras finas com ciclones de recirculação electrostática que foram obtidos fora do âmbito deste trabalho, através de uma sucessão de processos de optimização.

Os processos de optimização dos sistemas passaram pela geometria do ciclone, que foi obtida após um processo de optimização numérica, originando os ciclones Hurricane[®]. Em seguida, estes ciclones foram acoplados a um ciclone recirculador de passo simples, no sentido de promover a reinjecção de partículas que tinham escapado ao ciclone Hurricane[®], dando origem ao que se designa comercialmente como ReCyclone[®] MH e por fim, o sistema estudado tem no recirculador um eléctrodo de emissão, para promover ainda mais a recirculação de partículas para o ciclone Hurricane[®], sendo este referido como ReCyclone[®] EH.

Neste trabalho testa-se a hipótese de que a aglomeração interparticular dentro do ciclone Hurricane[®] é a principal razão para as elevadas eficiências de captura do sistema. Esta aglomeração é um fenómeno que ocorre predominantemente entre as partículas muito pequenas e as partículas maiores, devido essencialmente à sua diferença de velocidades.

Esta hipótese parece traduzir o que acontece na prática, uma vez que o sistema estudado tem a particularidade de obter curvas de eficiência fraccional com uma forma de gancho, isto é, no caso do ReCyclone[®] EH, obtém-se captura completa para partículas muito finas (normalmente inferiores a $0.3\ \mu\text{m}$) e para partículas maiores (normalmente superiores a $6\ \mu\text{m}$), tendo uma zona de diâmetros intermédios, onde a eficiência de captura é mais baixa.

No sentido de estudar o efeito da aglomeração dentro do ciclone, foi feito o acoplamento de um modelo de aglomeração interparticular aos diversos modelos com a capacidade de previsão do ciclone isolado e do ciclone com recirculação mecânica e electrostática, sendo o modelo final referido como PACyc.

Fizeram-se testes exaustivos ao modelo PACyc, sendo apresentado um estudo de sensibilidade paramétrica aos parâmetros mais relevantes do modelo desenvolvido. Este foi ainda usado para prever as eficiências experimentais obtidas para os diversos casos apresentados, tendo obtido bons resultados quanto à previsão da eficiência global em função de diversas condições operatórias e de configurações do sistema. É assim possível afirmar que o PACyc se apresenta como uma boa ferramenta de previsão da eficiência global do sistema estudado neste trabalho.

Identificaram-se como limitações do modelo a impossibilidade prática de se fazer uma amostragem realmente representativa da distribuição granulométrica, devido a restrições de memória e de tempo de CPU. Esta limitação impediu a obtenção de curvas de eficiência fraccional em forma de gancho pronunciado.

Por fim, foram realizados ensaios preliminares de optimização da configuração geométrica do eléctrodo usado no recirculador, tendo-se chegado à conclusão que eléctrodos de alta emissão tipo *Pipe and Spike* têm performances melhores do que um eléctrodo composto por um fio condutor simples.

Palavras chave: Ciclones de Elevada Eficiência, Dispersão Turbulenta, Aglomeração Interparticular, Optimização Geométrica de Eléctrodo, Modelização.

Abstract

The objective of this thesis is the conceptualization, modelling and experimental validation of *Capture of Fine Dusts in Gas-Cyclones with Electrostatic Recirculation*, a system that was obtained, in previous work, by a succession of optimization processes.

These optimization processes started with the cyclone design, which was the solution of a numeric optimization problem, that led to the Hurricane[®] cyclone systems. These reverse-flow gas-cyclones (collector) were then combined with a straight-through gas-cyclone (recirculator) in order to promote the reinjection/recirculation of particles that escaped the Hurricane[®] cyclone, leading to what is commercially referred as ReCyclone[®] MH. Finally, by inserting an emission electrode in the recirculator to promote even further the recirculation of particles to the Hurricane[®] cyclone, being referred as ReCyclone[®] EH.

In this work the hypothesis of interparticle agglomeration inside the Hurricane[®] gas-cyclone being the major reason for the high collection efficiencies of these systems is tested. This agglomeration is a phenomenon that mainly occurs between the very small particles and larger particles, due essentially to the difference in the particles' velocities.

This hypothesis seems to translate what happens in experiments, since the studied system has the particularity of obtaining "hook-like" grade-efficiency curves, i.e., for the ReCyclone[®] EH complete collection is obtained for very small particles (usually smaller than 0.3 μm) and for large particles (usually larger than 6 μm), having lower collection efficiencies at intermediate particle diameters.

In order to study the agglomeration effect inside the gas-cyclone, a model to predict interparticle agglomeration was combined to several models to predict the collection of gas-cyclones, and gas-cyclone with mechanical and/or electrostatic recirculation, leading to the final model referred as PACyc.

Extensive tests were made with the PACyc model, and the results of a sensitivity analysis study to the major parameters of the developed model are presented. This model was used to predict experimental efficiencies obtained for several cases, showing good predictions of overall efficiency for several operating conditions and configurations. Thus, it is possible to state that PACyc model is a good tool to predict overall collection by the systems studied in this work.

Some constraints of PACyc were identified relative to the practical impossibility of a complete representative sampling of the particle size distribution due to lack of memory and unreasonable CPU time. These constraints prevented the achievement of hook-like grade-efficiency curves.

Finally, preliminary tests were made in order to optimize the geometrical configurations of the emission electrode in the straight-through gas-cyclone, and the results allowed to conclude that high emission electrodes with the geometry known as Pipe and Spike lead to higher performances than a single-wire electrode.

Keywords: High Efficiency Gas-Cyclones, Turbulent Dispersion, Interparticle Agglomeration, Emission Electrode Geometrical Optimisation, Modelling.

Résumé

Cette thèse vise à la conceptualisation, modélisation et validation expérimentale de la capture de poussières fines avec des cyclones de recirculation électrostatique qui ont été obtenus à travers d'une séquence de processus de l'optimisation.

Les processus de l'optimisation des systèmes ont passé par la géométrie du cyclone, qui a été obtenue après un processus de l'optimisation numérique, donnant origine aux cyclones Hurricane[®]. En suite, ces cyclones ont été accouplés à un autre cyclone récirculateur de pas simple dans le but de faciliter l'injection de nouveau de particules qui avaient échappées au cyclone, donnant origine à ce qu'on désigne, commercialement, comme ReCyclone[®] MH. Finalement, le système étudié a, dans le récirculateur, un électrode d'émission, pour agir comme promoteur d'une plus grande recirculation des particules pour le cyclone Hurricane[®], étant, celui-ci, référé comme ReCyclone[®] EH.

Dans ce travail on essaie l'hypothèse de confirmer que l'agglomération inter-particulaire dans le cyclone Hurricane[®] est la principale raison pour obtenir d'hautes efficacités dans la capture du système. Cette agglomération est un phénomène qui arrive d'un rencontre prédominant entre les particules très petites et les particules plus grandes, essentiellement à cause de la différence de vitesse entre les particules.

Cette hypothèse semble traduire ce que arrive dans la pratique, étant donné que le système étudié, a la particularité d'obtenir des courbes d'efficacité fractionnelle dans la forme de crochet, c'est à dire, dans le cas du ReCyclone[®] EH, on obtient la capture complète dans les particules très fines ($< 0.3\mu\text{m}$) et, aussi pour les particules plus grandes (normalement $> 6\mu\text{m}$) ayant une zone entre ces deux diamètres où l'efficacité de capture est plus basse.

Dans le but d'étudier l'effet de l'agglomération dans le cyclone, on a fait l'accouplement d'un modèle d'agglomération inter-particulaire à chaque modèle avec la capacité de prévision du cyclone isolé et du cyclone avec recirculation mécanique et électrostatique, étant, le modèle final, référé comme PACyc.

On a fait des essais exhaustifs au modèle PACyc, et on a présenté une étude de sensibilité paramétrique aux paramètres plus remarquables du modèle développé. Celui-ci a été encore utilisé pour prévoir les efficacités expérimentales obtenues pour les divers cas présentés, et on a réussi de trouver de bons résultats concernant la prévision de l'efficacité globale en fonction de diverses conditions opératoires et des configurations du système. Comme ça, c'est possible d'affirmer que PACyc se présente comme un bon outil de prévision du système étudié dans ce travail.

Certaines contraintes de PACyc ont été identifiées par rapport à l'impossibilité pratique d'une représentation complète d'échantillonnage de la distribution granulométrique en raison d'un manque de mémoire et de temps CPU. Ces obstacles ont empêché la réalisation de courbes de efficacité en forme de crochet.

Finalement, on a réalisé des essais préliminaires d'optimisation de la configuration géométrique de l'électrode dans le récirculateur et on est arrivé à la conclusion que les électrodes de haute émission type «Pipe et Spike» sont plus performantes que une électrode composée par un fil conducteur simple.

Les Mots-clés: Cyclones de Haute Efficacité, Dispersion Turbulente, Agglomération Inter-Particulier, Optimisation Géométrique de l'Électrode, Modélisation

Índice

Preâmbulo	vii
Resumo	xi
Abstract	xiii
Résumé	xv
Lista de Figuras	xxiii
Lista de Tabelas	xxxi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objectivos a cumprir	2
1.3 Metodologias	3
1.4 Estrutura da Tese	4
2 Teoria da separação gás-sólido	7
2.1 Contextualização da separação gás-sólido	7
2.2 Ciclones	12
2.2.1 História dos ciclones (Hoffman e Stein, 2002)	12
2.2.2 Modelos de previsão do funcionamento de ciclones	13
2.2.3 Correlações para cálculo da dispersão turbulenta	20
2.2.4 Modelo de previsão do ciclone isolado	21
2.3 Ciclones com sistema de recirculação	30
2.3.1 Contextualização dos sistemas de recirculação	31

2.3.2	Modelo de previsão do sistema integrado ciclone/ciclone concentrador	34
2.4	Precipitação Electrostática	40
2.4.1	Contextualização histórica da precipitação electrostática	40
2.4.2	Bases teóricas da precipitação electrostática	42
2.4.3	Modelo de previsão do funcionamento da precipitação electrostática	43
2.5	Síntese	58
	Nomenclatura	59
3	Aglomeração interparticular em meios turbulentos	65
3.1	Turbulência	65
3.1.1	Contextualização da turbulência	65
3.1.2	Modelização da turbulência	67
3.2	Aglomeração	74
3.2.1	Evolução da teoria de colisão-aglomeração	76
3.2.2	Modelo usado neste trabalho	80
3.3	Síntese	93
	Nomenclatura	94
4	PACyc - Particle Agglomeration in Cyclones	99
4.1	Contextualização do modelo PACyc	99
4.2	Modelos base de previsão de eficiência de captura de partículas	103
4.2.1	Ciclones de fluxo-invertido	103
4.2.2	Ciclones de fluxo-invertido combinados com ciclones de recirculação	103
4.2.3	Ciclones de fluxo-invertido combinados com ciclones de recirculação com meios ionizados	104
4.3	Acoplamento da aglomeração interparticular	105
4.3.1	Definição do volume de controlo	109
4.3.2	Pré-processamento da distribuição mássica	113
4.3.3	Contextualização, reconstrução do histórico das partículas e cálculo das eficiências finais	116
4.4	Apresentação de resultados do modelo PACyc	127
4.4.1	Resultados intermédios	127
4.4.2	Análise das distribuições de tamanho das partículas	129
4.4.3	Cálculo da dispersão turbulenta	131

4.4.4	Definição do volume de controlo e condições de amostragem . . .	132
4.4.5	Estudo de sensibilidade paramétrica do modelo de aglomeração .	138
4.4.6	Estudo de sensibilidade paramétrica do modelo PACyc	146
4.5	Modelo PACyc integrando Recirculação Mecânica e Electrostática . . .	158
4.5.1	Linhas de base sem aglomeração	159
4.5.2	Aglomeração com recirculação mecânica	161
4.5.3	Aglomeração com recirculação electrostática	165
4.6	Casos de estudo com resultados particulares	170
4.6.1	Caso de estudo com ausência de aglomeração	171
4.6.2	Caso de estudo com supressão de corrente	175
4.7	Síntese	179
	Nomenclatura	181
5	Resultados Experimentais e Previsões PACyc	183
5.1	Condições operatórias	184
5.1.1	Caudais	188
5.1.2	Perdas de pressão	192
5.1.3	Caracterização do alimentador	193
5.2	Condições de amostragem	195
5.3	Processamento de resultados	199
5.3.1	Considerações acerca do isocinetismo	200
5.3.2	Particularidades dos resultados da amostragem <i>online</i>	205
5.3.3	Combinação dos resultados de amostragem <i>online</i> com os da amostragem <i>offline</i>	205
5.4	Exemplos de cálculo da eficiência experimental	207
5.4.1	Isocinética (à entrada)	208
5.4.2	Eficiência global	214
5.4.3	Exemplo de cálculo GRIMM entrada vs. GRIMM saída	215
5.4.4	Exemplo de cálculo COULTER entrada vs. COULTER saída . .	217
5.5	Ensaios experimentais	219
5.5.1	Caso 1 - Ciclone isolado	220
5.5.2	Caso 2 - Configuração do sistema e baixa concentração	223
5.5.3	Caso 3 - Alta concentração	227
5.5.4	Caso 4 - Alta concentração	230
5.5.5	Caso 5 - Condições operatórias	234

5.5.6	Caso 6 - Condições operatórias	239
5.5.7	Caso 7 - Supressão de corrente	242
5.6	Síntese do capítulo	245
	Nomenclatura	247
6	Estudos preliminares da geometria do eléctrodo de descarga	251
6.1	Geometrias de eléctrodo estudadas	252
6.1.1	Eléctrodos simples	252
6.1.2	Eléctrodos múltiplos	253
6.1.3	Eléctrodo com estrutura de arame farpado	255
6.1.4	Eléctrodos de alta emissão - <i>Pipe and Spike</i>	256
6.2	Avaliação da performance de cada geometria	258
6.3	Ensaio experimentais preliminares com fumos de incenso	262
6.3.1	Impacto do campo eléctrico nos sistemas com recirculação me- cânica vs. recirculação electrostática	263
6.3.2	Estudo da geometria dos eléctrodos	265
6.3.3	Conclusões do ensaio preliminar	269
6.4	Ensaio experimental comparativo	271
6.4.1	Caracterização das partículas	271
6.4.2	Curvas de Eficiência Fraccional	273
6.4.3	Conclusões	276
6.5	Síntese do capítulo	276
7	Conclusões e Trabalhos Futuros	279
7.1	Conclusões	279
7.2	Trabalhos futuros	283
	Referências	287
	Apêndices	295
A	Informações adicionais PACyc	297
A.1	Sistema equações expandido	297
A.1.1	Velocidades das partículas - Caso com $Re \geq 1000$	298
A.1.2	Velocidades das partículas - Caso com $Re < 1000$	299
A.2	Derivadas parciais do sistema de equações	300

A.2.1	Parâmetro A	300
A.2.2	Parâmetro B	300
A.2.3	Parâmetro C	301
A.2.4	Parâmetro D	301
A.2.5	Parâmetro E	302
A.3	Jacobiano do sistema de equações	302
A.3.1	Termos em $\frac{dx_p}{dt}$	302
A.3.2	Termos em $\frac{dy_p}{dt}$	302
A.3.3	Termos em $\frac{dv_{x,p}}{dt}$	303
A.3.4	Termos em $\frac{dv_{y,p}}{dt}$	303
	Nomenclatura	305
B	Ficheiros de dados do modelo PACyc	307
B.1	Distribuição cumulativa	307
B.2	Dados das partículas	308
B.3	Dados do ciclone	309
B.4	Dados de operação	311
B.5	Dados de simulação	311
B.6	Dados do recirculador	313
B.7	Dados do campo eléctrico:	314
B.8	Dados interacção:	315
C	Definições de variáveis relevantes para o modelo PACyc	319
C.1	Constante de Hamaker	319
C.2	Definição da criação de diâmetros novos	321
	Nomenclatura	323
D	Efeito da Aglomeração à Entrada	325
D.1	Pré-Processamento	325
D.2	Condições iniciais	327
D.3	Pós-Processamento	329
D.4	Resultados parciais	334
	Nomenclatura	336

Lista de Figuras

2.1	Diâmetros habituais de alguns materiais e métodos de separação gás-sólido aplicáveis segundo Elimelech et al. (1995)	8
2.2	Representação esquemática de um ciclone com recirculação mecânica e electrostática apresentado as entradas e saídas do sistema	11
2.3	Representação das dimensões gerais de um ciclone	15
2.4	Representação do ciclone cilíndrico proposto por Mothes e Löffler (1988)	23
2.5	Ciclone isolado	31
2.6	Ciclone isolado c/ recirculação	32
2.7	Ciclone acoplado a ciclone recirculador de passo simples	33
	(a) Ciclone c/ recirculação a montante	33
	(b) Ciclone c/ recirculação a jusante	33
2.8	Representação do ciclone cilíndrico com recirculador de passo simples proposto por Salcedo et al. (2007)	35
2.9	Desvio típico da curva potencial vs. corrente devido à presença de partículas	49
2.10	Representação das interfaces de separação propostas no modelo de captura por recirculação electrostática	57
3.1	Comparativo das velocidades características de cada mecanismo de colisão de uma partícula de 1µm em função do diâmetro da segunda partícula (Elimelech et al., 1995)	78
3.2	Definição do limite entre escoamento diluído ou denso em função da fracção volumica (e concentração mássica) e diâmetro de partícula, para diferentes flutuações de velocidade das partículas (Sommerfeld, 2001)	83
3.3	Posição relativa das partículas dentro do cilindro de colisão	88
	(a) Representação bidimensional (lateral)	88

(b)	Representação bidimensional (frontal)	88
3.4	Diagrama de colisão em função das linhas de corrente	90
4.1	Apresentação da ligação dos constituintes principais do modelo PACyc	101
4.2	Representação em diagrama de fluxo do modelo de aglomeração interparticular	106
4.3	Definição do volume de controlo	110
(a)	Representação (a cinza) do volume de controlo de colisão	110
(b)	Representação do ciclone discretizado	110
4.4	Propriedades das partículas em função da sua posição no volume de controlo	111
4.5	Cada fatia com sub-fatias/sectores	113
(a)	0 sub-fatias	113
(b)	1 sub-fatias	113
(c)	2 sub-fatias	113
(d)	3 sub-fatias	113
4.6	Proporção de partículas finais por cada uma das classes iniciais (matriz)	126
(a)	t= 0.0 ms	126
(b)	t= 0.5 ms	126
(c)	t= 2.0 ms	126
(d)	t= 2.5 ms	126
(e)	t= 5.0 ms	126
(f)	t= 10.0 ms	126
4.7	Trajectória-tipo de uma partícula de diâmetro 1 μm em meio turbulento	128
4.8	Trajectórias com aglomeração e correspondente processamento do aglomerado formado	129
(a)	Trajectórias e aglomeração de duas partículas	129
(b)	Cálculo do diâmetro do novo aglomerado	129
4.9	Distribuições de tamanho de partículas pré e pós-aglomeração	130
(a)	Distribuição numérica	130
(b)	Distribuição mássica	130
4.10	Análise de sensibilidade - dispersão turbulenta	131
4.11	Análise de sensibilidade considerando o volume de controlo discreto - número de fatias	133
4.12	Análise de sensibilidade - diâmetro de truncatura (com volume de controlo com 1 fatia)	136
4.13	Análise de sensibilidade - amostragem aleatória	137

4.14	Análise de sensibilidade ao modelo de aglomeração - parâmetros a e b propostos por Löffler (1988)	139
(a)	Parâmetro a	139
(b)	Parâmetro b	139
(c)	Parâmetros a e b	139
4.15	Análise de sensibilidade ao modelo de aglomeração - coeficiente de restituição energética	141
4.16	Análise de sensibilidade ao modelo de aglomeração - distância de contacto .	142
4.17	Análise de sensibilidade ao modelo de aglomeração - pressão de contacto .	144
4.18	Análise de sensibilidade ao modelo de aglomeração - Casos estudo de Gronald e Staudinger (2006)	145
4.19	Análise de sensibilidade ao modelo PACyc - tempo de interacção	147
4.20	Análise de sensibilidade ao modelo PACyc - massa volúmica	148
4.21	Análise de sensibilidade ao modelo PACyc - concentração	149
4.22	Análise de sensibilidade ao modelo PACyc - coeficiente de fricção interparticular	150
4.23	Análise de sensibilidade ao modelo PACyc - passo de integração	151
4.24	Análise de sensibilidade ao modelo PACyc - factor multiplicativo	153
4.25	Análise de sensibilidade ao modelo PACyc - número de sub-fatias razoáveis	154
4.26	Análise de sensibilidade ao modelo PACyc - número de sub-fatias limite . .	155
4.27	Análise de sensibilidade ao modelo PACyc com 70k partículas - número de corridas	156
4.28	Análise de sensibilidade ao modelo PACyc com 120k partículas - número de corridas	157
4.29	Linhas de base em função do sistema: ciclone isolado vs. ciclone com recirculação mecânica vs. ciclone com recirculação electrostática	160
4.30	Representação das zonas de interacção interparticular do modelo PACyc . .	162
4.31	Curvas de eficiência fraccional quando o sistema está a operar com recirculador sem campo eléctrico e considerando apenas a aglomeração dentro do ciclone	164
4.32	Curvas de eficiência fraccional quando o sistema está a operar com recirculador com campo eléctrico e considerando apenas a aglomeração dentro do ciclone e a linha de base com todos os fenómenos envolvidos	166

4.33	Curvas de eficiência fraccional quando o sistema está a operar com recirculador com campo eléctrico e considerando apenas a aglomeração dentro do ciclone e a linha de base apenas com a recirculação mecânica	168
4.34	Detalhe das curvas de eficiência fraccional quando o sistema está a operar com recirculador com campo eléctrico e considerando apenas a aglomeração dentro do ciclone e a linha de base apenas com a recirculação mecânica . . .	169
4.35	Distribuição de tamanho de partículas à entrada - Caso 4.6.1	172
4.36	Caso de estudo 4.6.1 - Ciclone isolado	173
4.37	Caso de estudo 4.6.1 - Ciclone com recirculação mecânica	174
4.38	Distribuição de tamanho de partículas à entrada - Caso 4.6.2	176
4.39	Linha de base e caso exemplo ($\rho_{ap} = 1080\text{kg/m}^3$, $c=120\text{g/m}^3$) - Caso 4.6.2	177
4.40	Curvas de eficiência fraccional em função da concentração, com $\rho = 1800\text{kg/m}^3$ - Caso 4.6.2	178
5.1	Fotografia da instalações piloto e identificação dos componentes principais do sistema	185
5.2	Diagrama P&ID simplificado à escala piloto	186
5.3	Diagrama dos pontos de amostragem à escala piloto	187
5.4	Caudal mássico do sistema à escala piloto	189
	(a) Função Frequência Ventiladores	189
	(b) Ajustes lineares	189
5.5	Caudal volúmico do sistema à escala piloto	190
	(a) Função Frequência Ventiladores	190
	(b) Ajustes lineares	190
5.6	Caudal volúmico à entrada do ciclone à escala piloto	191
	(a) Função Frequência Ventiladores	191
	(b) Ajustes lineares	191
5.7	Velocidade central na tubagem em função da velocidade média à entrada/-saída do sistema	191
5.8	Quedas de pressão (total,ciclone e recirculador) em função da velocidade à entrada do ciclone	193
5.9	Esquema do alimentador usado na instalação piloto (TOPAS, 2009)	194
5.10	Caudal volúmico de partículas em função da percentagem de alimentação .	195
5.11	Vários tipos de amostragem de correntes gasosas (adaptado de Strauss (1975))	196
	(a) Anisocinética: velocidade baixa	196

(b)	Anisocinética: velocidade alta	196
(c)	Isocinética	196
5.12	Diâmetro de sonda para o GRIMM em função do caudal volúmico	198
5.13	Equipamento usado para amostragem isocinética	201
(a)	Representação da sonda isocinética usada para amostragem <i>offline</i>	201
(b)	Erros na amostragem	201
5.14	Folha de cálculo com o processamento de resultados da amostragem isocinética	213
5.15	Distribuição de tamanho de partículas: entrada no sistema e emissões gasosas	221
5.16	Curvas de Eficiência Fraccional	222
5.17	Distribuição de tamanho de partículas: entrada e emissões do sistema	224
5.18	Curvas de Eficiência Fraccional	225
5.19	Distribuição tamanho de partículas: entrada do sistema e emissões	228
5.20	Curva de eficiência fraccional experimental e previsão do PACyc	229
5.21	Eficiências globais em função da concentração	230
5.22	Distribuição tamanho de partículas: entrada do sistema e emissões	231
5.23	Curva de eficiência fraccional experimental e previsão do PACyc	232
5.24	Eficiências globais em função da concentração	233
5.25	Distribuição de tamanho de partículas: entrada e emissões do sistema	235
5.26	Curvas de Eficiência Fraccional	236
5.27	Curvas de Eficiência Fraccional previstas	238
5.28	Distribuição de tamanho de partículas: entrada e emissões do sistema	240
5.29	Curvas de Eficiência Fraccional	241
5.30	Eficiência global em função da concentração à entrada para dois casos com quedas de pressão total diferente	244
(a)	0.93 kPa	244
(b)	1.60 kPa	244
5.31	Supressão de corrente em função da concentração à entrada	244
(a)	Experimental	244
(b)	Experimental, ajuste e extrapolação	244
6.1	Geometria do recirculador e posicionamento dos pontos de apoio dos dife- rentes eléctrodos	252
6.2	Geometrias dos eléctrodos simples estudadas	253
(a)	Eléctrodo simples	253
(b)	Eléctrodo simples mais fino	253

6.3	Geometrias dos eléctrodos múltiplos estudadas	254
(a)	Eléctrodo triplo	254
(b)	Eléctrodo sêxtuplo	254
6.4	Geometria tipo dos eléctrodos baseados em arame farpado estudadas . . .	256
6.5	Geometrias dos eléctrodos de alta emissão (<i>Pipe and Spike</i>) estudadas . .	257
(a)	2 farpas	257
(b)	3 farpas	257
(c)	4 farpas	257
(d)	6 farpas	257
6.6	Geometria tipo dos eléctrodos baseados em arame farpado estudadas . . .	258
6.7	Curvas características para os eléctrodos simples	259
6.8	Curvas características para os eléctrodos múltiplo	259
6.9	Curvas características para os eléctrodos tipo arame farpado	260
6.10	Curvas características para os eléctrodos de alta emissão (<i>Pipe and Spike</i>) .	260
6.11	Distribuição de tamanho de partículas: entrada e emissões do caso com 3 paus de incenso	264
6.12	Curvas de Eficiência Fraccional das configurações estudadas: ciclone com recirculação mecânica e ciclone com recirculação mecânica e campo elec- trostático	265
6.13	Distribuição de tamanho de partículas para cada uma das geometrias anali- sadas para o caso preliminar de incenso: à entrada e correspondentes emissões	267
(a)	Simples	267
(b)	Multifilares	267
(c)	Arame Farpado	267
(d)	<i>Pipe and Spike</i>	267
6.14	Curvas de eficiência fraccional para cada uma das geometrias analisadas para o caso preliminar de incenso	268
(a)	Simples	268
(b)	Multifilares	268
(c)	Arame Farpado	268
(d)	<i>Pipe and Spike</i>	268
6.15	Detalhe das curvas de eficiência fraccional das geometrias que levaram a melhores resultados para o caso preliminar de incenso: arame farpado fino e <i>Pipe and Spike 6</i>	270

6.16 Distribuição de tamanho de partículas: entrada e emissões do sistema a 0.93 kPa	271
6.17 Distribuição de tamanho de partículas: entrada e emissões do sistema a 1.60 kPa	272
6.18 Curvas de Eficiência Fraccional a 0.93 kPa	273
6.19 Curvas de Eficiência Fraccional a 1.60 kPa	275
6.20 Eficiências globais para os casos experimentais estudados, em função da concentração e do tipo de eléctrodo eléctrodo	276
(a) 0.93 kPa	276
(b) 1.60 kPa	276
D.1 Diagrama da zona de confluência à entrada do ciclone com recirculação mecânica	327
D.2 Diferentes fases do pós-processamento da aglomeração à entrada	334
(a) Conversão da distribuição mássica inicial sob a forma de histograma e de função na correspondentes distribuição numérica inicial	334
(b) Distribuição numérica inicial, correspondente <i>spline</i> e interpolação do número inicial de partículas para os diâmetros finais	334
(c) <i>Spline</i> correspondente à distribuição numérica inicial, identificando a variação dos diâmetros finais e correspondente transcrição para a <i>spline</i> correspondente à distribuição numérica final	334
(d) Conversão da <i>spline</i> correspondente à distribuição numérica final na correspondente <i>spline</i> representativa da distribuição mássica final	334
D.3 Distribuições de tamanho de partículas pré e pós-aglomeração à entrada do ciclone	335
(a) Distribuição mássica	335
(b) Variação da distribuição mássica	335

Lista de Tabelas

2.1	Patentes relativas ao sistema estudado: ciclone, ciclone com recirculação mecânica e ciclone com recirculação electrostática	11
2.2	Definição das variáveis usadas para definir a geometria do ciclone	15
2.3	Definição das variáveis usadas para definir a geometria do recirculador	36
2.4	Gamas mais comuns das variáveis com impacto na Corona	46
4.1	Exemplo de resultados de discretização após pré-processamento	115
4.2	Geração de alguns dos primeiros diâmetros	119
4.3	Exemplos colisões “ternárias” e “quaternárias”	120
4.4	Constituição de cada diâmetro	122
4.5	Registo de cada colisão de cada diâmetro	123
4.6	Diâmetro de cada partícula e correspondente eficiência inicial (por fatia)	124
4.7	Eficiências globais (sem aglomeração) em função da dispersão turbulenta	132
4.8	Eficiências globais em função do número de fatias	134
4.9	Eficiências globais em função do diâmetro de truncatura	136
4.10	Eficiências globais em função do número de partículas da amostragem aleatória	137
4.11	Combinações usadas no estudo de sensibilidade aos parâmetros a e b propostos por Löffler (1988)	138
4.12	Eficiências globais em função dos parâmetros a e b	139
4.13	Eficiências globais em função do coeficiente de restituição energética	141
4.14	Eficiências globais em função da distância de contacto	143
4.15	Eficiências globais em função da pressão limite de contacto	144
4.16	Combinações usadas no estudo desenvolvido por Grondal e Staudinger (2006)	145
4.17	Eficiências globais em função dos valores dos parâmetros usados por Grondal e Staudinger (2006)	145

4.18	Eficiências globais em função dos valores do tempo de interacção	147
4.19	Eficiências globais em função dos valores da massa volúmica	148
4.20	Eficiências globais em função dos valores da concentração	149
4.21	Eficiências globais em função dos valores do coeficiente de fricção interpar- ticular	151
4.22	Eficiências globais em função dos valores do passo de integração	152
4.23	Eficiências globais em função dos valores do factor multiplicativo	153
4.24	Eficiências globais em função do número de sub-fatias	156
4.25	Eficiências globais em função da corrida e de número de partículas amostrado	158
4.26	Parâmetros definidos para o caso de introdução ao modelo PACyc com re- circulação electrostática	160
4.27	Eficiências globais base em função da configuração do sistema	161
4.28	Eficiências globais com recirculação mecânica e aglomeração dentro do ciclone	164
4.29	Eficiências globais com recirculação electrostática com aglomeração à <i>pos- teriori</i>	166
4.30	Eficiências globais com recirculação electrostática com aglomeração entre a recirculação mecânica e a recirculação electrostática	168
4.31	Eficiências globais caso 4.6.1	175
4.32	Eficiências globais caso 4.6.2	179
5.1	Diâmetros do bocal da sonda do GRIMM e respectivas gamas de velocidade	197
5.2	Determinação de um perfil de velocidades à entrada do sistema exemplo . .	209
5.3	Caudal amostrado pela sonda isocinética em função da posição radial . . .	211
5.4	Cálculo da eficiência global do sistema	214
5.5	Processamento dos dados em bruto do GRIMM à entrada e à saída	216
5.6	Cálculo da eficiência fraccional COULTER à entrada vs. COULTER à saída	218
5.7	Síntese das variáveis alteradas em cada um dos casos experimentais apre- sentados	220
5.8	Eficiência global experimental e prevista por Smolik e PACyc	222
5.9	Eficiência global experimental e prevista por Mothes e Löffler (1988) e PACyc	225
5.10	Eficiência global experimental e prevista por Mothes e Löffler (1988) e PACyc	229
5.11	Eficiência global experimental e prevista por Mothes e Löffler (1988) e PACyc para um caso com a concentração média	233
5.12	Eficiência global experimental e prevista por Mothes e Löffler (1988) e Sal- cedo et al. (2007) e PACyc	237

5.13	Eficiência global prevista pelo PACyc (com e sem aglomeração) e respectiva extrapolação* da eficiência global experimental	238
5.14	Eficiência global experimental e prevista por Mothes e Löffler (1988) e PACyc	242
6.1	Potencial de início de Corona e intensidade de corrente máxima dos eléctrodos usados nas experiências efectuadas neste trabalho	262
6.2	Eficiência global experimental para o caso com incenso	265
6.3	Mediana e percentagem de partículas submicrométricas das distribuições de tamanho de partículas à entrada para o caso do incenso com várias geometrias de eléctrodos	267
6.4	Eficiência global experimental para cada uma das geometrias estudadas . .	269
6.5	Eficiência global experimental e prevista por Mothes e Löffler (1988) e PACyc	275
B.1	Ficheiro de dados com a distribuição mássica cumulativa	308
B.2	Ficheiro de dados acerca das partículas alimentadas ao sistema	309
B.3	Ficheiro de dados com a geometria do ciclone e cálculo da dispersão turbulenta	310
B.4	Ficheiro de dados com as condições operatórias	311
B.5	Ficheiro de dados com os condições de simulação	312
B.6	Ficheiro de dados com a geometria do recirculador e cálculo da dispersão turbulenta	313
B.7	Ficheiro de dados com as condições do campo eléctrico	314
B.8	Ficheiro de dados com informação acerca do modelo de aglomeração interparticular	315
D.1	Definição das classes finais das partículas iniciais	330
D.2	Exemplo do tratamento das distribuições mássicas com <i>splines</i>	332

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo são abordadas as questões motivacionais que levaram ao desenvolvimento deste trabalho, para além de serem traçados os objectivos a cumprir e a correspondente estrutura da tese.

1.1 Motivação

A remoção de partículas das emissões de processos industriais é um problema que afecta grande parte da indústria, sendo estimado que em Portugal 32% das PME e 20% das grandes indústrias não cumpram os limites de emissões de partículas para a atmosfera (Agency, 2004; Gomes, 2005).

A remoção de partículas finas das emissões de processos industriais, vulgarmente referidas por PM_{10} e sobretudo as mais finas dentro dessas, as $PM_{2.5}$ e $PM_{1.0}$, são sem dúvida dos maiores desafios para quem desenvolve sistemas de despoeiramento.

Existem diversos equipamentos para despoeirar, sendo normalmente utilizados filtros de mangas ou electrofiltros, de forma a que as emissões para a atmosfera estejam dentro dos limites legais. Estes equipamentos apresentam como principais desvantagens para o caso dos filtros os elevados custos de manutenção, enquanto que para o caso dos electrofiltros estes representam quase sempre grandes investimentos.

Assim sendo, no sentido de tentar arranjar uma alternativa viável, foi desenvolvido um sistema composto por um ciclone de fluxo invertido com a opção de funcionar com ou sem recirculação parcial de gases e partículas. Estes equipamentos não sofrem das desvantagens apresentadas acima, e com as geometrias numericamente optimizadas conseguem remover as partículas com eficiências adequadas, apresentando-se, em muitos casos, como alternativas viáveis aos filtros e aos electrofiltros.

No sentido de garantir que estes equipamentos sejam altamente eficientes, foram feitas posteriores optimizações, sendo alvo deste trabalho a alteração do sistema de recirculação, onde foi induzido um campo eléctrico, no sentido de se obterem níveis de despoeiramento típicos dos electrofiltros.

Tendo isto presente, este trabalho visa o estudo experimental e teórico, à escala piloto, da aplicação de ciclones com recirculação electrostática ao despoeiramento de emissões gasosas com partículas finas ($< 10 \mu\text{m}$), de forma a que seja possível prever o funcionamento da unidade instalada em 2001 na Fábrica de Ácido Sulfanílico da empresa **CUF - Químicos Industriais, SA.** Esta unidade é composta por um sistema de ciclones com recirculação mecânica, sendo de interesse prever qual o benefício para a empresa, se nos recirculadores instalados se introduzisse um campo eléctrico.

Espera-se com este trabalho mostrar claramente a mais-valia que estes sistemas trazem, comprovando a sua viabilidade como despoeiradores (nas mais variadas condições), usando os resultados a nível piloto e o código de simulação desenvolvido, para extrapolar a sua performance à escala industrial.

1.2 Objectivos a cumprir

Neste trabalho pretende-se cumprir os seguintes objectivos:

1. **Estabelecer à escala piloto a relevância de cada um dos fenómenos em causa neste sistema, mas com particular ênfase para a recirculação electrostática, na captura de poeiras muito finas (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ e $\text{PM}_{1.0}$):** Para tal, deverão ser desenvolvidas experiências a nível piloto de forma a mostrar o impacto de cada uma das variáveis de operação (caudais, concentração, diferentes pós, etc.) nos resultados finais de captura do sistema;
2. **Seleccção dos modelos de captura para cada um dos fenómenos a modelizar (ciclone isolado, ciclone com recirculação mecânica e electrostática):** Tendo presente que existem vários modelos de previsão para captura em ciclones, em ciclones com recirculação e de precipitadores electrostáticos, deverá ser feita uma escolha dos modelos mais adequados para prever cada um dos fenómenos isoladamente;
3. **Elaboração de um modelo de captura de partículas que reflecta a presença simultânea de recirculação mecânica e recirculação electrostática:** Usando os modelos escolhidos, dever-se-á conseguir integrá-los de forma a que seja possível modelizar os efeitos da recirculação mecânica e electrostática simultaneamente;

4. **Acoplamento de um modelo que leve em consideração os fenómenos de aglomeração interparticular:** É pretendido que se escolha um modelo de aglomeração interparticular adequado e fazer com que este permita estudar o fenómeno de aglomeração (dentro do ciclone), no sentido de justificar a elevada captura das partículas mais finas nestes sistemas de alta eficiência;
5. **Fazer uma caracterização (o mais completa possível) do comportamento deste sistema no que diz respeito às eficiências de remoção obtidas:** Dever-se-á conseguir prever dentro de um determinado intervalo a eficiência de captura de um dado sistema (ciclone isolado, ciclone com recirculação mecânica ou ciclone com recirculação electrostática) a operar em condições definidas à partida (operatórias, partículas, etc.);
6. **Fazer uma comparação da performance da recirculação electrostática em função da geometria de vários eléctrodos:** Pretende-se que seja feito um estudo do impacto da geometria do eléctrodo na capacidade de captura do sistema, de forma a que se possam propor geometrias específicas/óptimas para cada caso.

1.3 Metodologias

Em termos de metodologias adoptadas, este projecto é uma extensão de trabalho experimental com ciclones de fluxo invertido (com e sem recirculação mecânica) previamente desenvolvido pela equipa de investigação onde o projecto está inserido.

No sentido de desenvolver o modelo que prevê o funcionamento deste sistema, optou-se pela construção de um modelo que funcione por módulos dos vários sub-modelos a funcionar isoladamente e estabelecer a comunicação entre os diversos módulos. Desta forma, com um modelo integrado é possível de uma forma simples, comparar o efeito de cada um dos fenómenos.

Em termos experimentais, as medições apresentadas neste trabalho foram feitas sempre à escala piloto, tendo sido usadas várias amostras de pós com propriedades diversas, no sentido de mostrar o comportamento do sistema para a multiplicidade de situações.

Nesse sentido foram não só feitos ensaios com recirculação, mas também ensaios só com o ciclone, para ser possível observar o impacto de cada um dos fenómenos em relação à linha de base do ciclone isolado.

No caso do ciclone com recirculação electrostática, foram ainda feitas experiências adicionais com diferentes eléctrodos de emissão com várias geometrias, no sentido de

conseguir maximizar a captura de partículas do sistema.

1.4 Estrutura da Tese

Esta tese encontra-se estruturada em onze (11) partes: sete (7) capítulos e quatro (4) apêndices. Apresentam-se em seguida, de uma forma muito sucinta, o que é abordado em cada destas.

Capítulo 1 São apresentadas as principais motivações que levaram ao desenvolvimento deste trabalho, traçando os principais objectivos a cumprir. É ainda apresentada a estrutura desta tese.

Capítulo 2 Apresentando a problemática subjacente à separação gás-sólido, é introduzido o sistema estudado. Através de uma breve introdução histórica dos equipamentos integrados no sistema usado (ciclones e precipitador electrostático), apresentam-se em detalhe os 3 principais modelos de previsão de captura usados neste trabalho.

Capítulo 3 Introduce-se o fenómeno de aglomeração interparticular em meio turbulento, através de uma contextualização das equações e realidades envolvidas na simulação de escoamentos turbulentos com as equações de Navier-Stokes. São apresentados alguns modelos de turbulência desenvolvidos a partir destas, culminando com a apresentação em detalhe do modelo de aglomeração interparticular adoptado neste trabalho.

Capítulo 4 É apresentada a estratégia de integração dos modelos dos capítulos 2 e 3 através do modelo PACyc, com principal ênfase nas alterações feitas no modelo de aglomeração, de forma a que fosse possível a construção do histórico de aglomeração ao longo do sistema. Apresentam-se resultados-tipo do modelo PACyc assim como um estudo de sensibilidade paramétrica a algumas das principais variáveis do modelo.

Capítulo 5 É feita a validação do modelo PACyc como ferramenta de previsão à escala piloto/industrial, através da comparação dos resultados experimentais com previsões do modelo, sendo isto feito para vários casos de estudo que pretendem mostrar a versatilidade do modelo desenvolvido.

Capítulo 6 É elaborado um estudo sintético acerca do impacto da geometria do eléctrico na performance do sistema com recirculação electrostática, apresentando os resul-

tados de dois ensaios experimentais e a partir destes, são retiradas algumas conclusões acerca da geometria do eléctrodo.

Capítulo 7 Apresentam-se as principais conclusões a reter deste trabalho. São propostos desenvolvimentos futuros da ferramenta desenvolvida neste trabalho, assim como, são feitas sugestões de optimização do sistema à escala piloto, de forma a aumentar a eficiência de captura do mesmo.

Apêndice A Informações matemáticas adicionais acerca do sistema de equações diferenciais ordinárias que é necessário integrar no estudo da trajectória das partículas em meio turbulento (expansão do sistema, derivadas parciais e jacobiano).

Apêndice B Apresentação dos ficheiros de introdução de dados no modelo PACyc, fazendo uma breve descrição de cada uma das variáveis. Além disso, são contextualizadas as opções passíveis de serem feitas pelo utilizador.

Apêndice C Descrição em maior detalhe de alguns conceitos relevantes para o modelo PACyc, tendo presente que alguns destes conceitos estão intrinsecamente ligados ao modelo de aglomeração.

Apêndice D É apresentada a formulação matemática usada para estudar a aglomeração à entrada quando o sistema opera com recirculação mecânica. Apresenta-se ainda um resultado a título de exemplo, no sentido de tornar evidente que esta zona não é relevante para a aglomeração global que ocorre nestes sistemas.

Capítulo 2

Teoria da separação gás-sólido

Sumário do Capítulo

Neste capítulo é apresentada uma compilação da bibliografia mais relevante para este projecto, sendo que se apresentam as evoluções históricas das tecnologias de despoeiramento.

Além disso, apresentam-se os modelos teóricos aplicados para previsão do funcionamento do sistema estudado neste trabalho.

2.1 Contextualização da separação gás-sólido

A poluição atmosférica é uma preocupação social de há muitas décadas, sendo de conhecimento comum que as partículas suspensas no ar causam aumento das doenças respiratórias, principalmente em meios altamente urbanizados.

Por esta razão, a legislação aplicável às emissões gasosas tem vindo a sofrer actualizações no sentido de restringir progressivamente as emissões de poluentes para a atmosfera. Este aumento de exigência tem-se mostrado como um apelo ao desenvolvimento de novas tecnologias, no sentido de produção de equipamentos progressivamente mais robustos e eficientes, minimizando simultaneamente custos quer de manutenção, quer de produção.

Para além do cumprimento da legislação ambiental, diversos equipamentos de separação gás-sólido, como os filtros de mangas, os precipitadores electrostáticos, os ciclones, entre outros, são também utilizados para capturar partículas sólidas com valor económico. Exemplos disso são os catalisadores, ou até mesmo produtos finais que estejam em forma de pós finamente divididos.

Outra razão para a remoção de partículas das correntes gasosas é a minimização da erosão de equipamentos a jusante, como por exemplo, turbinas e ventiladores.

Em função da motivação por trás da remoção dos sólidos das correntes gasosas, podemos ter como objectivo a minimização da concentração admissível nas correntes (no caso de cumprimentos da legislação das emissões) ou por outro lado definindo o maior diâmetro de partículas admissível nas correntes (no caso de protecção dos equipamentos a jusante).

Tendo em conta que os sólidos normalmente presentes nas correntes gasosas não tomam formas específicas, podendo variar não só a sua forma, mas também as suas características físicas (como a densidade, propriedades de adesão, área específica, etc.) é necessário que os equipamentos de separação gás-sólido tenham a capacidade de processar uma grande variedade de materiais, sendo esta uma das razões de existirem separadores mais específicos conforme o tipo de produtos e partículas processados. É apresentado na Figura 2.1 um resumo dos diferentes tipos de pó e dos tipos de equipamento passíveis de serem aplicados em função dos diâmetros médios das partículas.

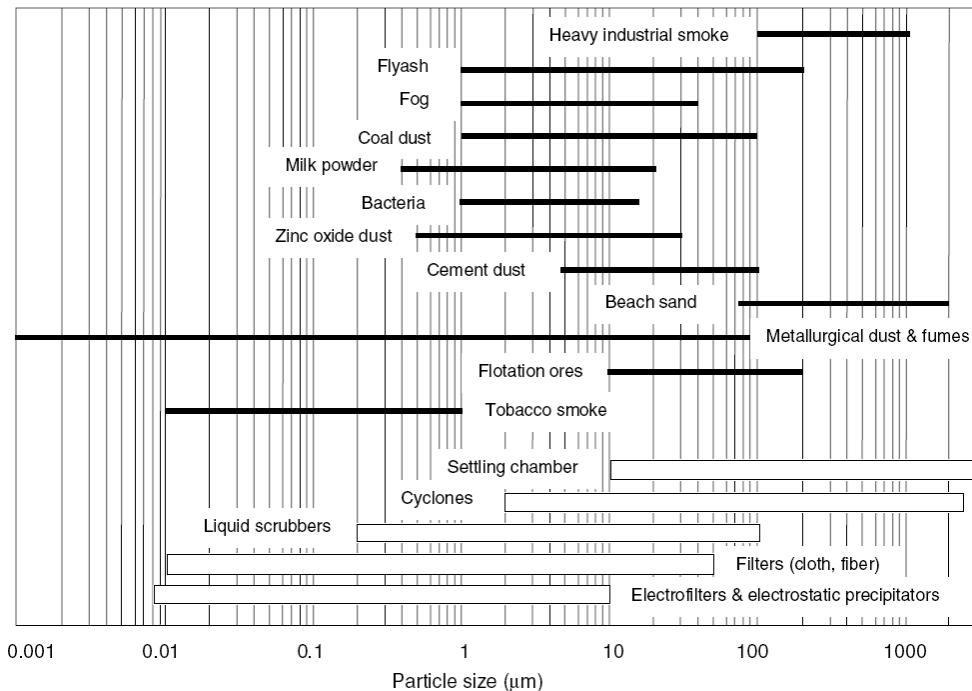


Figura 2.1 Diâmetros habituais de alguns materiais e métodos de separação gás-sólido aplicáveis segundo Elimelech et al. (1995)

Começando por fazer um breve enquadramento dos diversos métodos de separação gás-sólido, um dos mais comuns é a filtração. De uma forma muito sucinta, este processo é definido como a passagem forçada da corrente gasosa através de um filtro composto por fibras entrelaçadas, do tipo feltro ou tecido.

O tamanho do poro do filtro é normalmente maior do que algumas das partículas que ficam retidas nele, uma vez que no início do processo de filtração é formado um bolo que enquanto está a aumentar de espessura, a correspondente eficiência da filtração aumenta sendo também acompanhada pelo aumento da queda de pressão. Quando a queda de pressão chega a um certo limite, é necessário limpar o filtro, sendo isto normalmente conseguido através de um pulso de ar em sentido inverso ao da filtração, recolhendo-se o bolo de filtração nas tremonhas.

A grande vantagem da filtração é a sua alta eficiência, sendo as principais desvantagens o facto de se tratar de um processo inerentemente descontínuo, com perdas de pressão e consequente consumo de energia oscilante e o facto de grande parte dos filtros não serem adequados para ambientes agressivos ou com altas temperaturas.

Existem formas de separação alternativas, como o caso dos precipitadores electrostáticos, onde se recorre ao uso de corrente eléctrica para promover a deposição de partículas através de um processo de carga, mas estes serão discutidos em maior detalhe na Secção 2.4, uma vez que se tratam de um tipo de equipamento com especial relevância no desenvolvimento deste trabalho.

Outro tipo de separadores comuns, são os lavadores, onde ou se faz passar o gás por uma câmara com gotas de um fluido, ou se pulveriza o gás com um fluido que humedeça as partículas sólidas suspensas no gás. Este tipo de equipamento está acoplado quer a montante de separadores inerciais como ciclones ou câmaras de sedimentação, quer a jusante, dependendo de está integrado no despoeirador inercial ou se actua independentemente deste (lavagem de gases)

Os lavadores podem ter particular interesse na captura de partículas com diâmetros mais pequenos, especialmente os lavadores tipo *venturi*, onde o fluido é sujeito a elevadas acelerações, o que favorece a coalescência entre as partículas e as gotas. Neste tipo de equipamento, normalmente há elevadas perdas de pressão e introdução de humidade nas correntes gasosas, saturando-as muitas vezes.

As câmaras de sedimentação são equipamentos que conseguem ter performances competitivas com outros tipos de equipamento de despoeiramento, quando o fluido é composto por partículas de maior diâmetro. Isto é conseguido, fazendo passar as partículas pela câmara, a uma velocidade do fluido muito baixa, deixando que as partículas assentem por acção da gravidade. Estes equipamentos são normalmente usados para

separar partículas com diâmetros superiores a 100 μm .

Existem ainda os separadores que usam os princípios de aceleração centrípeta para conseguir com que haja a separação das partículas do gás, sendo normalmente conhecidos por separadores centrífugos/ciclónicos.

As grandes vantagens destes tipos de equipamento é que são caracterizados por terem uma boa relação custos de investimento vs. custos de manutenção, por não terem partes móveis na sua constituição e por funcionarem a uma queda de pressão constante, entre outras. Algumas das desvantagens destes equipamentos passam por normalmente apresentarem perdas de pressão superiores a outros equipamentos de despoeiramento ou por (em geometrias comuns) apresentarem baixas eficiências nos casos de captura de partículas finas e/ou quando os fluidos têm baixas concentrações de partículas.

Tendo em conta que estes equipamentos fazem parte do núcleo deste trabalho, é feita uma contextualização histórica da evolução do desenho de ciclones, apresentando em seguida a evolução dos modelos propostos para previsão e desenho de ciclones, apresentando por último, e em maior detalhe, o modelo base de previsão de eficiência de captura de partículas usado neste trabalho, proposto por Mothes e Löffler (1988).

O sistema estudado tem como propósito a remoção de material particulado de emissões gasosas e é constituído por um ciclone com a geometria numericamente otimizada e correspondente ciclone recirculador de passo simples com fonte de alta tensão de corrente contínua. Esta última tem como propósito criar um campo eléctrico de forma a carregar as partículas electricamente, e fazer com que exista um efeito semelhante à precipitação electrostática, aumentando assim a quantidade de partículas recirculadas e de uma forma indirecta, a captura efectiva das mesmas. A designação deste sistema actualmente é Hurricane[®] (ciclone isolado), ReCyclone[®] MH (ciclone com recirculação mecânica) e ReCyclone[®] EH (ciclone com recirculação electrostática) e encontra-se protegido pelas patentes apresentadas na Tabela 2.1, sendo estas propriedade do Professor Romualdo Salcedo, tendo este cedido os direitos de exploração à empresa Advanced Cyclone Systems S.A..

Para tornar mais evidente a constituição do sistema estudado, apresenta-se na Figura 2.2 um esquema representativo do ciclone de fluxo invertido associado ao ciclone concentrador com campo electrostático.

Descrevendo de uma forma breve o funcionamento do sistema de despoeiramento estudado, o gás “sujo” entra tangencialmente no topo do ciclone, sendo constituído por ar e partículas. A mistura gás/partículas faz um percurso descendente ao longo do ciclone, chegando a um ponto em que inverte o sentido devido aos efeitos do campo de pressões, justificando assim a nomenclatura dada a este sistema: ciclones de fluxo-invertido.

Tabela 2.1 Patentes relativas ao sistema estudado: ciclone, ciclone com recirculação mecânica e ciclone com recirculação electrostática

Referência	Patente	Estado
Hurricane®	EP 0972572	Concedida
	PT 102166	Concedida
ReCyclone® MH	US 2002178793	Concedida
	WO 0141934	Concedida
	PT 102392	Concedida
	CAN 2394651	Concedida
ReCyclone® EH	PCT/PT2008/000024	Pendente
	WO 2008147233	Pendente

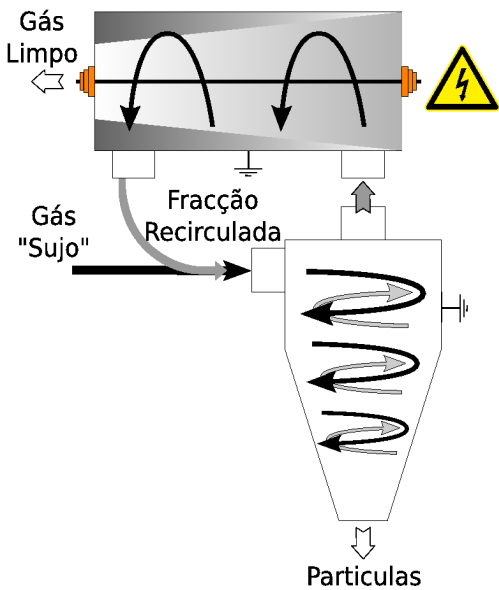


Figura 2.2 Representação esquemática de um ciclone com recirculação mecânica e electrostática apresentado as entradas e saídas do sistema

Neste percurso, as partículas que colidem com a parede do ciclone, são capturadas no fundo do ciclone enquanto as restantes partículas são arrastadas pelo fluido, saindo axialmente pelo topo do ciclone, e entram no ciclone recirculador, onde uma vez mais são cicloneadas. As que se aproximam das paredes do ciclone recirculador são reinjectadas na corrente de entrada do ciclone de fluxo-invertido (gás "sujo"), enquanto as restantes

partículas saem na corrente gás “limpo”, escapando ao sistema.

Tendo isto presente, de forma a aumentar a eficiência de captura das partículas no sistema, induz-se uma corrente eléctrica no sistema de recirculação, com o objectivo de carregar electricamente as partículas, promovendo um efeito semelhante ao da precipitação electrostática das mesmas. Com isto, consegue-se aumentar a recirculação efectiva das mesmas ao ciclone colector, principalmente das partículas mais finas, que são as que escapam com maior incidência aos sistemas Hurricane® e ReCyclone® MH.

2.2 Ciclones

Sendo os ciclones de fluxo-invertido e os ciclones de passo simples uma das partes do sistema estudado neste doutoramento, apresenta-se em maior detalhe uma contextualização histórica desta tecnologia. Apresenta-se ainda a evolução dos modelos de previsão da performance dos ciclones terminando com a apresentação do modelo de Mothes e Löffler (1988), que foi usado para prever o comportamento na ausência de aglomeração, do ciclone Hurricane®.

2.2.1 História dos ciclones (Hoffman e Stein, 2002)

A primeira patente atribuída a um ciclone data de 1885 e foi atribuída a John M. Finch e à empresa Knickerbocker Company. Embora esse seja o primeiro equipamento a usar os princípios teóricos que baseiam o funcionamento do ciclone tal como conhecemos actualmente, a operação deste não corresponde ao que acontece hoje em dia, uma vez que o pó era retirado e colectado pela parte lateral do cilindro (que constituía o corpo do ciclone), ao contrário dos actuais ciclones, onde o pó é colectado pelo fundo cónico do ciclone.

O grande pioneirismo de Finch está patente na ideia de usar a força centrífuga para tornar mais célere o processo de separação de partículas do gás, uma vez que, para que uma partícula de 10µm com densidade unitária desça 1 metro numa câmara com ar parado (onde apenas se exercem a força gravítica e de arrasto nas partículas) é necessário um tempo superior a 5 minutos. A ideia de Finch permite que, em vez de ser o balanço entre a força gravítica e a força de arrasto a determinar o percurso da partícula, seja de facto a força centrífuga a ter o papel preponderante na separação gás-sólido, uma vez que esta é muito mais forte do que a força gravítica neste tipo de equipamento.

Aproveitando a ideia de Finch, no início do século XX começaram a surgir ciclones com aspectos mais próximos dos ciclones actuais. Estes já usufruíam das principais características favoráveis à utilização destes equipamentos, como a simplicidade de cons-

trução associados a baixos custos de construção (muito devido à falta de equipamentos móveis na sua constituição) assim como a baixa manutenção.

Seguiram-se anos de constantes melhorias no desenho dos ciclones, com várias propostas das proporções relativas das principais características geométricas. Conseguiram-se desenhos de ciclones muito específicos, isto é, o desenho do ciclone estava fortemente ligado à indústria para a qual este era desenvolvido.

Em termos da utilização destes, conforme o tempo foi passando, houve uma mudança de tipo de produtos onde estes eram aplicados, sendo que no início do século eram essencialmente aplicados para moagens e produtos de madeira, até que hoje em dia se apresentam aplicações que vão desde estações de produção de electricidade, passando por secadores de spray, leitos fluidizados, unidades de combustão, etc.. Os ciclones têm também sido usados para a classificação de sólidos, em função do seu comportamento aerodinâmico, sendo usados para caracterizar densidade, tamanho e até mesmo forma das partículas de sólidos.

Os princípios físicos nos quais assentam as leis que governam os ciclones estão baseados em leis universalmente aceites, como o são as Leis de Newton e as Leis de Stokes. No entanto, ainda existem muitas questões sem resposta, uma vez que hoje em dia existem dificuldades em prever com precisão a performance do ciclone em função do seu tamanho, da sua geometria, das características da entrada implicando por isso alguma incerteza no que diz respeito ao desenho, operação e performance do ciclone, estando, segundo Hoffmann e Stein (2002), ainda longe de ser possível de fazer uma optimização global do sistema de captura.

2.2.2 Modelos de previsão do funcionamento de ciclones

Existem três áreas onde a teoria de ciclones se debruçou ao longo do tempo: o estudo do fluxo gás-sólido, a eficiência de separação e a queda de pressão. Os modelos de previsão do comportamento dos ciclones levam estas três áreas em linha de conta sendo apresentadas algumas das noções que estão na base da teoria de ciclones.

Para iniciar o estudo dos ciclones, é necessário que se parta das equações de transporte gás-sólido que são normalmente obtidas a partir de simplificações das equações de Navier-Stokes. No entanto, existem abordagens mais simples, que permitem de uma forma intuitiva, desenvolver modelos mais simples destas equações.

Um dos princípios base da dinâmica de fluidos é a continuidade, que traduz o facto de matéria alguma poder ser criada ou destruída. Esta é traduzida (quando o fluido é incompressível $\frac{d\rho}{dx} = \frac{d\rho}{dt} = 0$) pela equação 2.1, onde ∇ é o operador nabla e traduz

as derivadas parciais em ordem a cada uma das direcções coordenadas e $\vec{v}$ é o vector velocidade do fluido.

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (2.1)$$

Outro dos princípios básicos é a equação da continuidade de movimento (ou de conservação de momento) que é tradução para fluidos da segunda lei de Newton, e é apresentada na equação 2.2,

$$\rho \frac{D \vec{v}}{D t} = -\nabla p - \nabla \tau + \rho \vec{g} \quad (2.2)$$

onde p é pressão, ρ a massa volúmica do fluido, $\vec{g}$ é a aceleração gravitacional e τ é a tensão de corte. Esta pretende mostrar que a trajectória das partículas de fluido é resultado do balanço de forças estabelecidas sobre cada um dos elementos de volume de controlo.

Considerando diferentes processos simplificativos destas equações, conseguem-se diversos modelos de previsão da evolução do fluido dentro dos ciclones. Como exemplo desses processos simplificativos temos o modelo de Mothes e Löffler (1988) que é o modelo que serviu de base para previsão da eficiência de captura no ciclone.

Generalizando as características geométricas dos ciclones, apresenta-se na Figura 2.3 a identificação destas, e na Tabela 2.2 as respectivas descrições, uma vez que os resultados do modelo estudado estão fortemente ligados à geometria de cada ciclone.

Considerando que este tipo de equipamento data do século passado, vários modelos foram desenvolvidos no sentido de prever a sua eficiência de captura. Embora neste trabalho só se apresente em detalhe o modelo seleccionado para prever o funcionamento do ciclone, são apresentados os outros modelos que de certo modo o originaram, sendo feita em seguida uma breve referência a estes, apresentando as suas principais características e simplificações.

Lapple (1951) Sendo este um dos modelos primordiais, baseia a sua previsão de captura das partículas no tempo de voo das partículas no ciclone, e assume as partículas que escaparão ao ciclone são aquelas que, estando mais afastadas da parede cilíndrica, no seu trajecto descendente não têm tempo de colidir com essa parede.

Este modelo propõe que o número de voltas que o gás faz no interior do ciclone deveria ser determinado experimentalmente, ainda que para um dado tamanho de ciclone

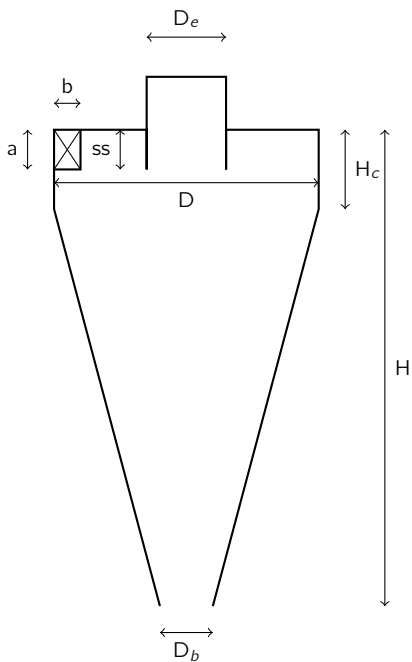


Figura 2.3 Representação das dimensões gerais de um ciclone

Tabela 2.2 Definição das variáveis usadas para definir a geometria do ciclone

Variável	Descrição
a	altura da entrada do fluido
b	largura da entrada do fluido
ss	distância de saída do ar ao topo do ciclone
D_e	diâmetro de saída do ar
H_c	altura do cilindro do ciclone
D_b	diâmetro de saída das partículas
H	altura do ciclone
D	diâmetro do ciclone

amplamente estudado pelo autor, o valor de cinco (5) voltas tenha sido obtido, e usado no sentido de prever o funcionamento do ciclone noutras condições.

Este modelo introduz ainda o conceito de diâmetro de corte, que mais não é do que o diâmetro de partículas a que corresponde uma eficiência teórica de captura de 50%.

A eficiência de captura dos restantes diâmetros é calculada em função de um parâmetro adimensional $\frac{d_p}{d_{50}}$, através de uma relação empírica estabelecida pelo autor.

Barth (1956) Este modelo é um modelo baseado no balanço de forças efectuado à partícula quando sujeita a um fluxo ciclónico e permite não só o cálculo da eficiência teórica prevista, mas também as correspondentes perdas de pressão.

A base de cálculo deste modelo passa por considerar que uma partícula dentro do ciclone sofre a acção de duas forças opostas (uma centrífuga e outra de arrasto), sendo ambas função da posição radial.

A estimativa de eficiência é feita em função do diâmetro de corte definido por Lapple (1951), e em casos particulares, apresenta boa concordância com os valores experimentais obtidos (Altmeyer et al., 2004).

Muschelknautz e Krambrock (1970) Este modelo que, foi posteriormente optimizado por Muschelknautz e Trefz (1990, 1991), é um modelo baseado no modelo de Barth (1956), uma vez que leva em linha de conta que as eficiências de captura das partículas são função do diâmetro de corte, determinado pelas expressões válidas no modelo de Barth (1956).

Para além disso, no sentido de melhorar as previsões do modelo, é feita uma ponderação do factor de fricção “efectivo” das partículas dentro do ciclone, levando em linha de conta a fricção do ar no ciclone e a fricção resultante do arrasto das partículas.

Tendo em consideração o factor de fricção “efectivo” e outros parâmetros geométricos, para prever as perdas de pressão no ciclone, este modelo considera 3 zonas diferentes: perdas de pressão no corpo do ciclone, no vórtice e na zona de entrada.

O ponto onde este modelo é diferente da formulação genérica adoptada pela maioria dos outros modelos de previsão é a consideração do efeito de massa à entrada do ciclone. Através de uma série de cálculos, o modelo define se uma parte das partículas à entrada do ciclone é capturada sem ser classificada, isto é, independentemente do diâmetro das partículas, uma fracção da massa total à entrada é capturada. Quando tal acontece, a eficiência é calculada por uma expressão, levando a eficiências de captura muito acima das previstas pelo modelo de Barth (1956). Por outro lado, quando não ocorre o efeito de massa, a eficiência de captura é calculada através de uma forma melhorada do modelo de Barth (1956).

Tendo isto presente, este é o único modelo estudado que introduz uma descontinuidade na previsão da eficiência de captura das partículas, sendo essa uma das suas grandes desvantagens, uma vez que para os limites à esquerda e à direita do valor a partir

do qual existe efeito de massa, os valores de eficiência são substancialmente diferentes.

Leith e Licht (1972) Este modelo baseia-se nos dados experimentais obtidos por Stairmand (1951). À semelhança do modelo de Barth (1956), este modelo leva em linha de conta o tempo de residência médio das partículas, mas esta teoria estima por omissão valores por excesso para a captura de partículas.

Além disso, este modelo não leva em linha de conta a variação da velocidade radial das partículas, o que faz com que não esteja coerente com o facto de uma das principais simplificações seja considerar que as partículas e os gases estão perfeitamente misturados em qualquer secção horizontal, desprovendo as partículas de características de velocidade em função da sua posição.

Clift et al. (1991) detectaram ainda um grave erro no modelo, ao não ser obedecido o critério de Danckwerts para o cálculo do tempo de residência médio do gás no ciclone.

Como principal consequência, este modelo não é muito sensível ao diâmetro de corte, adicionando mais fontes de erro a modelos anteriormente desenvolvidos (Montavon e et al., 2000).

Crawford (1976) Este modelo baseia-se na interpretação directa das equações de momento da partícula quando circula numa geometria em "U", não levando em linha de conta as características geométricas reais do ciclone.

Tem uma abordagem disjuntiva das equações que prevêm o comportamento das partículas em função do tipo de escoamento em que estas se encontram inseridas, introduzindo um parâmetro de ajuste para melhor descrever os sistemas a operar em condições turbulentas.

Dietz (1981) Contrariamente ao modelo de Leith e Licht (1972), este modelo usa os dados experimentais de Linden e Ter (1949) para prever a eficiência do ciclone.

Este modelo apresenta pela primeira vez um ciclone dividido em três regiões: entrada, fluxo descendente (anular) e fluxo ascendente (central). O modelo estabelece que existe troca de partículas entre as duas últimas.

Uma das simplificações não válidas deste modelo é a descontinuidade na transferência de massa entre zonas, facto que não traduz o que acontece na realidade.

Considerando ainda o tempo de residência médio das partículas para prever a sua captura, este modelo faz (à semelhança de Leith e Licht (1972)) previsões por excesso dos valores de captura experimentalmente obtidos, como provado por Marinos et al. (2007).

Mothes e Löffler (1988) Este modelo foi estendido a partir do modelo de Dietz (1981), considerando também que o ciclone está dividido em zonas, acrescentando porém uma quarta zona, que é a zona de saída de partículas, no sentido de levar em linha de conta a reinjecção de partículas no ciclone.

Comparativamente com Dietz (1981), os autores introduziram nos balanços de material diferenciais as condições fronteira que garantissem a continuidade entre zonas.

A eficiência global do ciclone passa a ser obtida após a resolução dos balanços de massa diferenciais em cada uma das zonas do ciclone e a dispersão turbulenta dentro do ciclone é considerada finita.

Poder-se-á dizer que este modelo é resultado da aprendizagem dos vários erros introduzidos por outros autores até à altura, revolucionando no sentido de incorporar mais variáveis físicas do problema, sendo por estas razões um dos modelos com maior precisão na previsão da captura de ciclones (Clift et al., 1991).

Ioia e Leith (1989) Este modelo, semi-empírico, baseia-se essencialmente na consideração de um estado pseudo-estacionário que as partículas de um dado diâmetro que estão dentro do ciclone têm. Estas partículas, de um tamanho crítico (correspondente ao diâmetro de corte) mantêm-se suspensas no limite da zona exterior de fluxo ascendente, com uma velocidade tangencial máxima e correspondente arrasto definido apenas pela velocidade do gás na zona da entrada do ciclone. Trata-se assim de um modelo derivado do modelo de Barth (1956).

O modelo considera que uma partícula desse tamanho crítico (diâmetro de corte) tem uma eficiência de captura de 50%.

São também estabelecidas relações entre a velocidade tangencial máxima, o diâmetro da zona central, o comprimento do vórtice central, levando em linha de conta o perfil de velocidade obtido experimentalmente.

Foi ainda estabelecida uma relação entre a eficiência de captura e o diâmetro adimensional (definido em função do diâmetro de corte), permitindo que este modelo faça previsões mais correctas do que os modelos de Lapple (1951), Barth (1956), Leith e Licht (1972) e Dietz (1981).

Li e Wang (1989) Tendo por base modelos como o que serviram de base para o modelo de Ioia e Leith (1989), este modelo propõe-se a estudar a trajetória da partícula dentro do ciclone, assumindo que as velocidades radiais assim como o perfil de concentrações destas não são constantes ao longo do eixo axial do ciclone.

Assim sendo, neste modelo é deduzida uma expressão bidimensional para os valores

de concentração, sendo esta função não só da posição radial, mas também da posição angular (que traduz uma posição axial) onde se encontra.

Ainda que este modelo leve em linha de conta a reentrada de partículas no ciclone, assim como a dispersão turbulenta das partículas, apresenta apenas boa concordância com as previsões do modelo de Barth (1956), assim como com resultados obtidos por Dirgo e Leith (1985), não produzindo bons resultados para casos alternativos.

Como demonstrado por Salcedo (1993), este modelo parte ainda de uma integração matematicamente inconsistente do perfil de velocidades nas direcções radial e axial.

Lorenz (1994) Adoptando a mesma estrutura que o modelo de Mothes e Löffler (1988), leva em linha de conta algumas hipóteses adicionais.

- Define um fluxo secundário considerando que existe uma zona estagnante no vórtice exterior no lado oposto ao da entrada do gás, entre a saída de gás e a parede do ciclone;
- Propõe uma correlação para o coeficiente de fricção das partículas com as paredes em função do número de Reynolds associado à velocidade tangencial perto da parede, da concentração de partículas dentro do ciclone e das características geométricas do mesmo;
- Considera que a dispersão turbulenta é dada por uma correlação em função do número de Reynolds do fluido calculado com a velocidade de saída do gás;
- Calcula a reentrada máxima de partículas no ciclone, sendo esta estimada através de uma correlação em função do número de Reynolds do fluido usando a velocidade deste dentro do ciclone (em função da posição axial);
- Estima ainda as perdas de pressão no ciclone, considerando quatro factores: *vena contracta*, características geométricas do ciclone, características do escoamento do fluido e impacto das partículas estarem suspensas no fluido.

Sendo este um modelo mais complexo do que o modelo de Mothes e Löffler (1988), considerou-se que o modelo de Mothes e Löffler (1988) previa com qualidade os ciclones estudados neste trabalho e que o esforço necessário para integração do modelo de Lorenz (1994) não levaria a resultados muito diferentes dos obtidos com o modelo de Mothes e Löffler (1988) como aliás demonstrado por Altmeyer et al. (2004), tendo sido esta a razão para não ter sido feito um estudo em maior detalhe deste modelo.

Avci e Karagoz (2000, 2001, 2003) O modelo de Avci e Karagoz (2000) apresenta uma forma alternativa de prever a eficiência de um ciclone, usando uma estratégia de previsão global do funcionamento do ciclone através da definição de um novo conjunto de parâmetros, que combinam características geométricas, concentração, fricção, etc.

O propósito deste modelo é tornar mais simples a previsão da eficiência dos ciclones, tendo este trabalho sido complementado por Avci e Karagoz (2001), com a adoção da mesma estratégia para previsão das perdas de pressão no ciclone. Finalmente, com o trabalho de Avci e Karagoz (2003), foram feitos pequenos ajustes na metodologia, e os modelos de previsão de captura e de perda de pressão foram integrados.

Este modelo produz em algumas situações resultados de boa qualidade, não apresentando no entanto a fiabilidade de outros modelos como o caso do modelo de Mothes e Löffler (1988).

2.2.3 Correlações para cálculo da dispersão turbulenta

Apresenta-se neste ponto uma breve descrição de cada uma das abordagens para o cálculo da dispersão turbulenta (D_{turb}).

Li e Wang (1989) Este modelo baseia o cálculo da dispersão turbulenta na combinação da expressão proposta por Taylor (1954) e no valor do coeficiente de fricção ($f = 0.02$) proposto por Dirgo e Leith (1985), considerando que a dispersão turbulenta é bem representada pela correlação proposta, usando a velocidade tangencial na posição radial igual ao raio de saída de gás limpo ($u(r_e)$), originando a equação 2.3,

$$D_{turb} = 0.052 \frac{D - D_e}{2} u(r_e) \sqrt{\frac{f}{8}} \quad (2.3)$$

em que $r_e = \frac{D - D_e}{2}$.

Lorenz (1994) Em relação à dispersão turbulenta, este modelo propõe uma forma alternativa para o seu cálculo (através da equação 2.4), sendo considerado que esta é função do número de Reynolds do ciclone considerando a velocidade à saída do gás (Re_{tr}).

$$D_{turb} = 0.006 \left(1 + \arctan \left[\frac{Re_{tr}}{136864} \right] \right) \quad (2.4)$$

Ogawa (1999) Trata-se de um modelo que usa uma correlação empírica numa câmara de vorticidade para calcular a dispersão turbulenta conforme o apresentado pela equação 2.5, onde g é aceleração da gravidade, D é o diâmetro do ciclone, μ é a viscosidade cinemática do fluido e u_{in} é a velocidade de entrada do gás no ciclone.

$$\frac{D_{turb}\sqrt{gD}}{\nu u_{in}} \approx 220 - 280 \quad (2.5)$$

Salcedo e Coelho (1999) Trata-se de um modelo que obtém uma correlação do valor da dispersão turbulenta, em função de características geométricas do ciclone e das partículas.

A correlação foi obtida considerando um conjunto de curvas de eficiência fraccional estudadas até à altura da publicação, sendo apresentada na equação 2.6,

$$Pe_p = 0.0342 Re_p^{1.263} \quad (2.6)$$

onde Pe_p é o número de Peclet radial da partícula dado pela equação 2.7, onde u_r é a velocidade radial do fluido, d_p é o diâmetro mediano da distribuição à entrada.

$$Pe_p = \frac{u_r d_p}{D_{turb}} \quad (2.7)$$

Quanto à variável Re_p corresponde ao número de Reynolds da partícula dado pela equação 2.8.

$$Re_p = \frac{\rho d_p u_r}{\mu} \quad (2.8)$$

2.2.4 Modelo de previsão do ciclone isolado

Tendo presente que é no modelo de Mothes e Löffler (1988) que o PACyc assenta, este será explicado em detalhe, no sentido de se evidenciar o processo de cálculo das curvas de eficiência teórica do ciclone. Apresenta-se a formulação segundo Altmeyer et al. (2004) baseada no modelo original de Mothes e Löffler (1988).

Caracterização do mecanismo de remoção das partículas

Estudos experimentais desenvolvidos por estes autores permitiram que fossem tiradas algumas conclusões acerca da caracterização do mecanismo de remoção de partículas:

1. A velocidade tangencial do gás depende, numa primeira aproximação, apenas da posição radial. A sua variação é função da geometria do ciclone, da rugosidade da parede e da concentração dentro do ciclone;
2. O transporte de partículas pode ser visto como um processo onde a dispersão se sobrepõe a um percurso determinístico. Enquanto que as trajectórias determinísticas permitem estimar o diâmetro de corte do ciclone, as trajectórias aleatórias influenciam a forma da curva de eficiência fraccional. Por esta razão, ambos os mecanismos devem ser levados em linha de conta para previsão do funcionamento do ciclone;
3. A superfície de separação entre os fluxos descendente e ascendente de gás tem particular relevância na performance do ciclone, uma vez que esta define o momento a partir do qual se considera que as partículas escaparam ao ciclone. No sentido de maximizar a captura no ciclone, deve-se retardar o máximo possível a entrada das partículas na zona axial central;
4. A reentrada de partículas já colectadas no cone do ciclone ou no fundo deste é um fenómeno com particular importância nos sistemas a operar a elevadas concentrações;

Características fluido-mecânicas

Este modelo numa primeira fase transforma o ciclone com geometria tronco-cónica, num ciclone cilíndrico equivalente, conforme a Figura 2.4.

Na Figura 2.4 são ainda apresentados os fluxos de partículas entre zonas, assim como os infinitésimos para os quais são estabelecidos os balanços de material para cada zona. Além disso identifica as quatro zonas do ciclone. Estas correspondem às:

1. Zona de Entrada;
2. Zona Axial Periférica;
3. Zona de Captura;
4. Zona Axial Central;

Este ciclone equivalente é definido tendo o mesmo volume e a mesma altura que o ciclone real. Sabendo que o ciclone original tem uma geometria tronco-cónica, o seu volume é calculado pela equação 2.9.

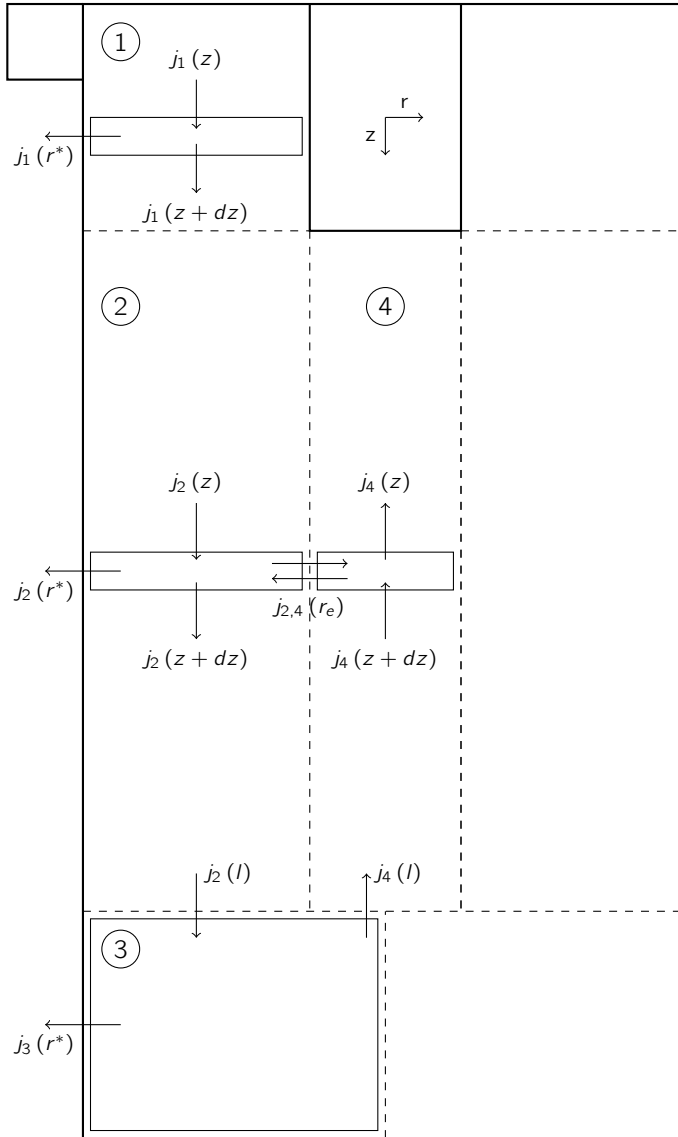


Figura 2.4 Representação do ciclone cilíndrico proposto por Mothes e Löffler (1988)

$$V_{ciclone} = \frac{\pi D_c^2 H_c}{4} + \frac{\pi (H - H_c) (D_c^2 + D_c D_b + D_b^2)}{12} \quad (2.9)$$

Pela simplificação previamente introduzida, o raio do ciclone equivalente é dado pela equação 2.10.

$$r^* = \sqrt{\frac{V_{ciclone}}{\pi H}} \quad (2.10)$$

A velocidade tangencial do gás sem fricção ($u^*(r^*)$), após determinada a aceleração centrífuga no vórtice, pode ser estimada pela relação proposta por Meissner (1978), segundo a qual a velocidade tangencial do gás para a posição radial igual ao raio externo do ciclone é maior do que a velocidade de entrada do gás, devido à existência de *vena contracta*. Considerando que não há fricção entre as paredes e o gás, a relação entre estas é apresentada pela equação 2.11,

$$\frac{u^*(r^*)}{v_d} = \frac{\pi r^{*2}}{a b \beta^*} \quad (2.11)$$

Considerando o caudal volúmico que dá entrada no ciclone (V_0), a equação 2.11 leva em consideração a velocidade à entrada ($u^*(r^*) = \frac{V_0}{ab}$) e a velocidade do gás dentro do ciclone ($v_d = \frac{V_0}{\pi(r^*)^2}$) cujo rácio com a componente tangencial é dado por β^* calculado pela equação 2.12.

$$\beta^* = -0.204 \frac{b}{r^*} + 0.889 \quad (2.12)$$

Assumindo que a totalidade da fricção entre o gás e a parede pode ser traduzida por um coeficiente de fricção efectivo (λ_e), a velocidade tangencial efectiva para a posição radial igual ao raio externo do ciclone é dada pela equação 2.13,

$$\frac{u(r^*)}{v_d} = \frac{1}{\lambda_e h_z^*} \left(\sqrt{\frac{1}{4} + \lambda_e h_z^* \frac{u^*(r^*)}{v_d}} - \frac{1}{2} \right) \quad (2.13)$$

com h_z^* a ser dado pela equação 2.14.

$$h_z^* = \frac{a}{r^*} \left(\frac{2\pi - \arccos\left(\frac{b}{r^*} - 1\right)}{2\pi} - 1 \right) + \frac{H_c}{r^*} \quad (2.14)$$

Usando a velocidade tangencial do fluido para a posição radial igual ao raio externo do ciclone, a velocidade tangencial do fluido em função da posição radial ($u(r)$) é dada pela equação 2.15,

$$u(r) = \frac{u(r^*)}{\frac{r}{r^*} \left(1 + \vartheta \left(1 - \frac{r}{r^*}\right)\right)} \quad (2.15)$$

onde ϑ é o momento angular do fluido entre a parede do ciclone e o gás e é calculado pela equação 2.16.

$$\vartheta = \frac{u(r^*)}{w(r^*)} \left(\lambda_{ciclone} + \frac{\lambda_{cone}}{\sin \epsilon} \right) \quad (2.16)$$

Nesta expressão, o coeficiente de fricção nas paredes ($\lambda_{ciclone}$ e λ_{cone}) para ciclones com parede suave, encontra-se entre os valores $0.0065 \leq \lambda_{ciclone} = \lambda_{cone} \leq 0.0075$, valores que foram obtidos após medições extensivas feitas por Meissner (1978). A variável ϵ refere-se ao ângulo entre o cone e a direcção axial do ciclone enquanto $w(r^*)$ é a velocidade radial do gás para a posição r^* .

Convém referir que a velocidade tangencial do gás depende da concentração de partículas, sendo as relações apresentadas apenas válidas para sistemas a funcionar a baixas concentrações.

Considerando por outro lado a velocidade radial do gás, é feita uma primeira aproximação, considerando o princípio de não deslizamento na parede (conforme equação 2.17) sendo que esta é constante para a posição radial igual ao raio de saída do gás do ciclone (r_e), sendo esta relação traduzida pela equação 2.18, considerando o caudal volumico para a respectiva posição axial ($V(z)$) dado pela equação 2.19.

$$w(r^*) = 0 \quad (2.17)$$

$$w(r_e) = \frac{V(z)}{2\pi r_e (H - L)} \quad (2.18)$$

Em relação ao caudal volumico de gás em função da posição axial, este é dado pela equação 2.19.

$$V(z) = \begin{cases} 0 & \text{com } 0 \leq z < H_c \\ V_0 \frac{H - z}{H - H_c} & \text{com } H_c \leq z \leq H \end{cases} \quad (2.19)$$

A este caudal volumico de gás corresponde à velocidade axial do gás dada pela equação 2.20.

$$v_z(z) = \frac{V_0 (h - z)}{\pi (r^{*2} - r_e^2) (H - ss)} \quad (2.20)$$

Este modelo suporta-se ainda na existência de um valor de dispersão turbulenta que melhor represente o funcionamento do ciclone. Assim sendo, o modelo foi adaptado para usar um dos modelos de cálculo de dispersão turbulenta anteriormente apresentados, ainda que na sua versão original, a dispersão turbulenta tomava um valor constante, $D_{turb} = 0.0125\text{m}^2/\text{s}$, que era o valor que ajustava mais correctamente os resultados experimentais obtidos pelos autores.

Remoção de partículas

Para o cálculo da variação axial da concentração de partículas, é assumida que cada unidade de volume de controlo funciona como se se encontrasse perfeitamente agitada, e que a entrada de partículas no ciclone é feita a um caudal volúmico de $\dot{V}_0$ e a uma concentração c_0 .

Zona de Entrada: Para a zona de entrada, referida na Figura 2.4 como zona 1, a expressão que traduz a variação da concentração ao longo da direcção axial é apresentada pela equação 2.21, onde $\dot{V}_0$ é o caudal volúmico de fluido, c_1 é a concentração na zona 1 e j_1 é o fluxo na zona 1.

$$\frac{d}{dz} [\dot{V}_0 c_1(z)] = -2\pi r^* j_1(r^*) \quad (2.21)$$

Nesta zona, as partículas acompanham a descida do gás, aproximando-se gradualmente da parede com velocidades próximas da velocidade terminal (w_s). A velocidade de deposição das partículas é dada pela equação 2.22, onde ρ_p é a massa volúmica das partículas, ρ é a massa volúmica do fluido, μ é a viscosidade do fluido, d_p é o diâmetro da partícula e $u(r)$ é a velocidade tangencial do gás.

$$w_s(r) = \frac{(\rho_p - \rho) d_p^2 u^2(r)}{18\mu r} \quad (2.22)$$

Com a velocidade das partículas e o perfil de concentrações, é possível calcular o fluxo de partículas em direcção à parede, apresentado pela equação 2.23

$$j_1(r^*) = w(r^*) c_1(z) \quad (2.23)$$

Zona Axial Periférica: Nesta zona, referida na Figura 2.4 como zona 2, a concentração é determinada não só pela deposição de partículas nas paredes, mas também pela permuta de partículas com a zona 4, devido às forças convectivas e difusivas. O balanço é traduzido pela equação 2.24, onde c_2 é a concentração na zona 2, j_2 é o fluxo na zona 2 e $j_{2,4}$ é o fluxo entre as zonas 2 e 4.

$$\frac{d}{dz} [\dot{V}_0 c_2(z)] = -2\pi r^* j_2(r^*) + 2\pi r_e j_{2,4}(r_e) \quad (2.24)$$

O fluxo em direcção à parede é dado, à semelhança da zona 1, pela equação 2.25.

$$j_2(r^*) = w(r^*) c_2(z) \quad (2.25)$$

A direcção do fluxo convectivo de partículas entre as zonas 2 e 4 depende da velocidade de deposição das partículas na parede ser maior ou menor do que a velocidade radial do gás. O fluxo dispersivo é determinado pelo gradiente de concentrações entre as duas zonas, assim como o coeficiente de dispersão turbulenta. Conforme o caso acima descrito, o fluxo entre zona é dado pelas expressões 2.26

$$j_{2,4}(r_e) = \begin{cases} -D_{turb} \frac{c_2(z) - c_4(z)}{r^* - r_e} + [w(r_e) - u(r_e)] c_4(z) & , w(r_e) \geq u(r_e) \\ -D_{turb} \frac{c_2(z) - c_4(z)}{r^* - r_e} + [w(r_e) - u(r_e)] c_2(z) & , w(r_e) < u(r_e) \end{cases} \quad (2.26)$$

Zona de Captura: Esta zona, identificada na Figura 2.4 como zona 3, caracteriza-se pela combinação das acções de reentrada das partículas já depositadas nas paredes e uma mistura (quase perfeita) de partículas quer em termos axiais quer em termos radiais. Assim, para traduzir o que se passa nesta zona, faz-se um balanço de material aproximando este volume de controlo a um sistema de parâmetros agrupados, isto é, que dependa apenas de uma dimensão (radial). Esse balanço de massa é traduzido pela na equação 2.27, onde j_3 é o fluxo na zona 3 e j_4 é o fluxo na zona 4.

$$j_2(l) \pi (r^{*2} - r_e^2) - j_4(l) \pi r_e^2 - j_3(r^*) 2\pi r^* (H - l) = 0 \quad (2.27)$$

O fluxo na zona 3 é dado pela equação 2.28, onde c_3 é a concentração na zona 3, $\dot{m}_w$ é o caudal mássico de partículas que reentram no ciclone e l é o comprimento característico do vórtice no ciclone.

$$j_3(r^*) = w(r^*) c_3 - \frac{\dot{m}_w}{2\pi r^* (H - l)} \quad (2.28)$$

Como aproximação, este modelo propõe que 10% do caudal de gás passe na zona 3, o que conduz a que o comprimento do vórtice (l) seja dado pela equação 2.29,

$$l = H - \frac{H - ss}{10} \quad (2.29)$$

Zona Axial Central: A equação 2.27 traduz o balanço de material na zona 4, onde o fluxo $j_{2,4}$ é calculado pela equação 2.26.

$$\frac{d}{dz} [\dot{V}_0 c_4(z)] = -2\pi r_e j_{2,4}(r_e) \quad (2.30)$$

Concentração de partículas no ciclone

Resolvendo os balanços de material zona a zona, apresentam-se nas equações 2.31, 2.32, 2.33 e 2.34 as concentrações nas quatro zonas do ciclone.

$$c_1(z) = c_0 \exp \left[-\frac{2\pi r^* w(r^*) \left(z - \frac{a}{2}\right)}{\dot{V}_0} \right] \quad (2.31)$$

$$c_2(z) = R_1 \left(\frac{H - z}{H - ss} \right)^{m_1} + R_2 \left(\frac{H - z}{H - ss} \right)^{m_2} \quad (2.32)$$

$$c_3 = \frac{c_2(l) + \frac{\dot{m}_w}{\dot{V}_0 \frac{H-l}{H-ss}}}{1 + \frac{w(r^*) 2\pi r^* (H - l)}{\dot{V}_0 \frac{H-l}{H-ss}}} \quad (2.33)$$

$$c_4(z) = R_1 \left(\frac{m_1 - A}{B} \right) \left(\frac{H - z}{H - ss} \right)^{m_1} + R_2 \left(\frac{m_2 - A}{B} \right) \left(\frac{H - z}{h - ss} \right)^{m_2} \quad (2.34)$$

As constantes apresentadas nas equações 2.32 e 2.34 são dadas pelas equações 2.35, 2.36 e 2.37.

$$m_{1,2} = \frac{A+D}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{A+D}{2}\right)^2 - (AD - BC)} \quad (2.35)$$

$$w(r_e) \geq u(r_e) \begin{cases} A = \frac{2\pi r^* w(r^*)(H-ss)}{V_0} + \frac{2\pi r_i D_{turb}(H-ss)}{V_0(r^*-r_e)} - 1 \\ B = -\frac{2\pi r_i D_{turb}(H-ss)}{V_0(r^*-r_e)} - \frac{2\pi r_e [w(r_e)-u(r_e)](H-ss)}{V_0} \\ C = \frac{2\pi r_e D_{turb}(H-ss)}{V_0(r^*-r_e)} \\ D = B - 1 \end{cases} \quad (2.36)$$

$$w(r_e) < u(r_e) \begin{cases} A = \frac{2\pi r^* w(r^*)(H-ss)}{V_0} - \frac{2\pi r_e [w(r_e)-u(r_e)](H-ss)}{V_0} + \\ + \frac{2\pi r_e D_{turb}(H-ss)}{V_0(r^*-r_e)} - 1 \\ B = -\frac{2\pi r_e D_{turb}(H-ss)}{V_0(r^*-r_e)} \\ C = \frac{2\pi r_e D_{turb}(H-ss)}{V_0(r^*-r_e)} - \frac{2\pi r_e [w(r_e)-u(r_e)](H-ss)}{V_0} \\ D = B - 1 \end{cases} \quad (2.37)$$

As condições fronteira aplicadas para calcular os valores das constantes de integração são apresentadas pelas equações 2.38 e 2.39,

$$c_2(ss) = c_1(ss) \quad (2.38)$$

$$c_4(l) = c_3 \quad (2.39)$$

implicando que as constantes gerais sejam dadas pelas equações 2.40 e 2.41,

$$R_1 = c_1(ss) - R_2 \quad (2.40)$$

$$R_2 = \frac{c_1(ss) + \frac{F}{\left(\frac{H-l}{h-ss}\right)^{m_2} \left(1 - \frac{F(m_1-A)}{B}\right)}}{1 - \frac{\left(\frac{B-E(m_2-A)}{B-E(m_1-A)}\right)}{\left(\frac{H-l}{H-ss}\right)^{m_1-m_2}}} \quad (2.41)$$

com as respectivas constantes simplificativas a ser calculadas pelas equações 2.42 e 2.43.

$$F = \frac{\dot{m}_w}{\dot{V}_0 \frac{H-l}{H-ss}} \quad (2.42)$$

$$E = 1 + \frac{w(r^*) 2\pi r^* (H-l)}{\dot{V}_0 \frac{H-l}{H-ss}} \quad (2.43)$$

No caso particular de não existir reentrada de partículas, a zona 3 pode ser desconsiderada e a solução passa a levar em consideração as simplificações apresentadas na equação 2.44.

$$I = H \wedge F = 0 \quad (2.44)$$

implicando que as novas condições fronteira sejam dadas pela equação 2.45.

$$R_1 = c_1(ss) \wedge R_2 = 0 \quad (2.45)$$

Eficiência de captura

A eficiência de remoção de cada diâmetro ($\eta(d_p)$) apresenta o rácio entre a massa de partículas (com diâmetro d_p) entre a entrada e a saída do ciclone.

Esta pode ser calculada de várias formas, sendo apresentada na equação 2.46 a forma de cálculo proposta.

$$\eta(d_p) = 1 - \frac{\dot{m}_a(d_p)}{\dot{m}_e(d_p)} = 1 - \frac{c_4(H-ss)}{c_0} \quad (2.46)$$

Esta fórmula é obtida considerando que c_0 é a concentração na entrada de partículas com diâmetro d_p e que $c_4(H-ss)$ é a concentração para o mesmo diâmetro na zona de saída.

2.3 Ciclones com sistema de recirculação

Tendo presente que o princípio teórico de separação de partículas em ciclones se baseia no aumento da velocidade das partículas, de forma a aumentar as forças centrífugas

e centrípetas sobre elas, um sistema com recirculação parcial de partículas e gás parece ser uma boa opção para melhorar a eficiência de captura, uma vez que este induz um aumento da velocidade das partículas dentro do ciclone.

Há, no entanto, que levar em consideração, que um aumento muito elevado da velocidade à entrada do ciclone favorece o arrastamento das partículas na corrente gasosa (fenómeno denominado por ressuspensão), diminuindo a eficiência de captura de partículas pelo ciclone. Além disso, esse aumento de velocidade traduz-se em maiores perdas de pressão e consequentemente custos de operação de ciclones mais elevados.

Considerando as realidades opostas apresentadas, é possível intuitivamente induzir que existe um valor óptimo de recirculação, onde se obtém a maior eficiência com perdas de pressão razoáveis (Berezowski e Warmuzinski, 1993).

2.3.1 Contextualização dos sistemas de recirculação

Estudando um pouco mais em detalhe a configuração dos sistemas de recirculação, pode-se estabelecer, considerando a nomenclatura da Figura 2.5, que a eficiência de um ciclone isolado é dada pela equação 2.47.

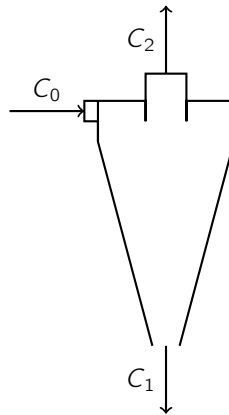


Figura 2.5 Ciclone isolado

$$\eta_c = 1 - \frac{C_2}{C_0} = \frac{C_1}{C_0} \quad (2.47)$$

Descrevendo em maior detalhe a Figura 2.5, esta apresenta a identificação das correntes que entram e saem do ciclone, onde C_0 é a concentração de partículas que sai do processo industrial a montante do ciclone (e que consequentemente dá entrada no

ciclone), C_1 é a concentração de partículas capturadas no sistema, C_2 é a concentração de partículas que escapa do sistema.

As Figuras 2.6 e 2.7 representam os sistemas com recirculação parcial de gases e partículas, onde é introduzida a variável C_0^* que corresponde à concentração de partículas após a junção das correntes “fresca”, isto é, a montante do ciclone e correspondente a C_0 , e a corrente recirculada (quando presente, correspondendo a C_R). Nos casos em que está presente, a variável C_3 é a concentração de partículas que saem do sistema concentrador (neste caso a montante) ou é a concentração de partículas que recircula (neste caso a jusante).

Considerando o sistema apenas com um ciclone, é possível considerá-lo com recirculação parcial de gás e partículas, conforme se apresenta na Figura 2.6. Considerando a razão de recirculação do sistema (R_r), a eficiência global deste sistema é dada pela equação 2.48, onde η_c é a eficiência de captura do ciclone sem recirculação.

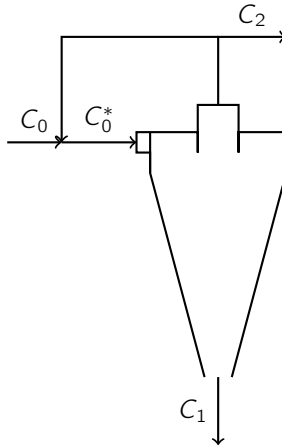


Figura 2.6 Ciclone isolado c/ recirculação

$$\eta = \frac{\eta_c}{1 - R_r (1 - \eta_c)} \quad (2.48)$$

Considerando estes sistemas de recirculação com acoplamento de um ciclone concentrador de passo simples, apresentam-se na Figura 2.7 duas configurações possíveis: o ciclone concentrador a montante ou a jusante do ciclone de fluxo invertido.

Considerando o sistema em que o ciclone concentrador está a montante do ciclone de fluxo invertido, sistema que foi estudado por Wysk et al. (1993), apresenta-se em

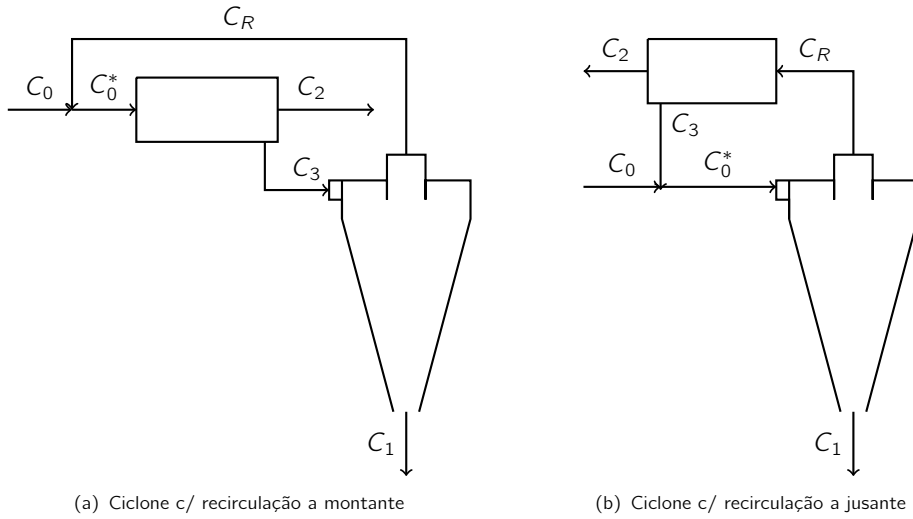


Figura 2.7 Ciclone acoplado a ciclone recirculador de passo simples

maior detalhe na Figura 2.7(a), e a correspondente eficiência global do sistema dada pela equação 2.49, onde η_R corresponde à eficiência de captura do ciclone concentrador.

$$\eta = \frac{\eta_R \eta_c}{1 - \eta_R (1 - \eta_c)} \quad (2.49)$$

Quando estudado o sistema em que o ciclone concentrador está a jusante do ciclone de fluxo invertido (conforme o apresentado na Figura 2.7(b)), sistema que foi estudado por Salcedo e Pinho (2003), a eficiência global do sistema é dada pela equação 2.50

$$\eta = \frac{\eta_c}{1 - \eta_R (1 - \eta_c)} \quad (2.50)$$

Comparando as equações 2.48, 2.49 e 2.50, é possível afirmar que:

- Um ciclone isolado, para um η_c constante, tem eficiência de captura (η) maior, conforme se aumenta o rácio de recirculação (R_r), tendendo para η_c quando este tende para zero;
- Um ciclone concentrador acoplado a montante, para η_c e η_R constantes, tem menores eficiências do que o equivalente a jusante, uma vez que o numerador para o caso a montante ($\eta_s \cdot \eta_c$) é sempre menor do que para o caso a jusante (η_c).

Tendo presente as conclusões apresentadas, e sabendo ainda que o sistema composto por um ciclone isolado, tem elevadas perdas de pressão quando operado com recirculação de gases e partículas, justifica-se a configuração do sistema estudado neste trabalho, uma vez que este é obtido através do acoplamento dos ciclones Hurricane[®] com um ciclone de passo simples a jusante e com recirculação parcial de gases e partículas.

Para modelizar o sistema com recirculação, considera-se válido o modelo apresentado na Secção 2.2.4 para simular o ciclone de fluxo invertido, e apresenta-se na secção 2.3.2 as equações respectivas para modelizar o concentrador.

2.3.2 Modelo de previsão do sistema integrado ciclone/ciclone concentrador

Este modelo foi objecto de trabalho anterior (Cândido, 2000; Salcedo et al., 2007), fazendo parte integrante do núcleo duro deste trabalho, uma vez que muitas das ferramentas desenvolvidas, tiveram-no como código-fonte de partida.

Características fluido-mecânicas

Considerando o caso particular estudado neste trabalho, a Figura 2.8 apresenta esta nova disposição assim como a identificação geométrica das variáveis usadas, enquanto que a Tabela 2.3 apresenta as respectivas designações.

Focando a zona do concentrador, e tendo por base as zonas em que o modelo de Mothes e Löffler (1988) divide o ciclone, este modelo começa por dividir o ciclone concentrador em 4 zonas, conforme a Figura 2.8.

À semelhança do modelo usado para prever a captura de partículas nos ciclones isolados, este modelo considera que existe um valor de dispersão turbulenta que afecta o comportamento das partículas dentro do ciclone concentrador. Levando em linha de conta a geometria e as velocidades dentro do concentrador, os valores de dispersão turbulenta são calculados por uma das correlações apresentadas na Secção 2.2.3.

Em termos de condições operatórias, para o modelo com recirculação, considera-se que $\dot{V}_0$ é o caudal volumico à entrada do concentrador (e no ciclone), com a correspondente concentração C_0 . Considera-se que a velocidade tangencial no recirculador tem a mesma dependência da posição radial apresentada para o ciclone de fluxo invertido. Como, no caso do recirculador, não existe cone, o parâmetro K (que traduz a transferência de momento angular entre a parede e o gás) é calculado pela equação 2.51,

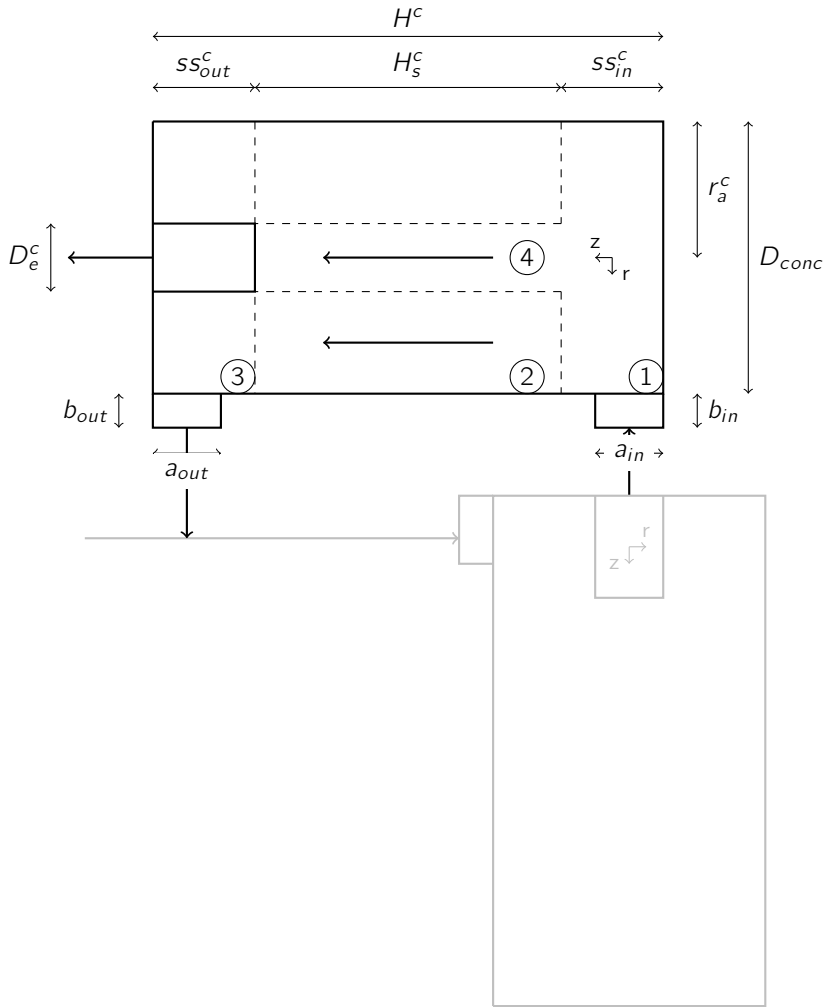


Figura 2.8 Representação do ciclone cilíndrico com recirculador de passo simples proposto por Salcedo et al. (2007)

$$K = \frac{u^c(r_a^c)}{v_d^c} \xi \quad (2.51)$$

onde ξ é o valor do coeficiente de fricção aparente (≈ 0.007 para ciclones com paredes polidas), $u^c(r_a^c)$ é a velocidade tangencial perto da parede devido ao efeito de *vena contracta* na zona de entrada e v_d é a velocidade no centro do recirculador, traduzida pela equação 2.52.

Tabela 2.3 Definição das variáveis usadas para definir a geometria do recirculador

Variável	Descrição
a_{in}^c	altura da entrada do fluido
b_{in}^c	largura da entrada do fluido
a_{out}^c	altura da saída do fluido que recircula
b_{out}^c	largura da saída do fluido que recircula
ss_{in}^c	distância da entrada do ar ao topo do ciclone
ss_{out}^c	distância da saída do ar ao fundo do ciclone
D_e^c	diâmetro de saída do ar
H_s^c	altura da zona de separação
H^c	altura total
D_{conc}	diâmetro do recirculador
r_a^c	raio do recirculador

$$v_d = \frac{\dot{V}_0}{\pi (r_a^c)^2} \quad (2.52)$$

Como aproximação, é considerada que a *vena contracta* é introduzida como a entrada tangencial no ciclone de fluxo invertido e que a fricção do gás devido à presença de partículas (quer suspensas ou na parede) é negligenciada.

Considerando a imagem do modelo de Mothes e Löffler (1988) para o ciclone, que o recirculador está dividido em 4 zonas, o modelo para o concentrador considera ainda que o caudal à entrada ($\dot{V}_0$) se divide em duas partes: uma delas recircula tangencialmente para o ciclone ($\dot{V}_2$) enquanto a outra escapa axialmente para a saída do recirculador ($\dot{V}_4$). Assim sendo, é possível estabelecer as relações traduzidas pelas equações 2.53 e 2.54,

$$\dot{V}_2 = R_r \dot{V}_0 \quad (2.53)$$

$$\dot{V}_4 = (1 - R_r) \dot{V}_0 \quad (2.54)$$

onde R_r é o rácio entre o caudal que recircula e o caudal total que entra no recirculador.

Remoção de partículas

Zona de entrada: Na zona de entrada do ciclone concentrador, à semelhança do ciclone de fluxo-invertido, as partículas têm a tendência de descer com o gás e aproximarem-se da parede a velocidades próximas da velocidade terminal.

Tendo isto presente, as equações pertinentes são em tudo equivalentes às apresentadas na secção 2.2.4, com a excepção do valor r^* , que passa a adoptar o valor r_a^c .

Zona Axial Periférica: Nesta zona, a concentração de partículas é determinada pela combinação dos fenómenos de deposição de partículas na parede, assim como trocas convectivas e dispersivas com a zona axial central.

O resultado líquido das trocas convectivas para a posição radial igual ao raio da saída do ar (r_i^c) depende da velocidade terminal das partículas (dada pela equação 2.22) e da velocidade radial do gás (dada pela equação 2.55).

$$v(r_i^c) = \frac{\dot{V}_4}{2\pi r_i^c h} \quad (2.55)$$

O fluxo dispersivo é determinado pelo gradiente de concentração entre as duas zonas e pelo coeficiente de dispersão das partículas dentro do ciclone concentrador. Tendo isso presente, a equação 2.56 traduz o balanço de material das partículas na zona axial periférica,

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 \frac{dC_2}{dz} = & -2\pi r_a^c w(r_a^c) C_2(z) + 2\pi r_i^c \left[-D_{turb} \frac{C_2(z) - C_4(z)}{r_a^c - r_i^c} \right] + \\ & + 2\pi r_i^c [w(r_i^c) - v(r_i^c)] C_4(z) \end{aligned} \quad (2.56)$$

onde D_{turb} é o coeficiente de dispersão das partículas dentro do ciclone concentrador. É possível reescrever a equação 2.56 considerando as expressões 2.57, 2.58 e 2.59,

$$A' = \frac{2\pi r_a^c w(r_a^c)}{\dot{V}_0} \quad (2.57)$$

$$B' = \frac{2\pi r_i^c D_{turb}}{(r_a^c - r_i^c) \dot{V}_2} \quad (2.58)$$

$$C' = \frac{2\pi r_i^c [w(r_i^c) - v(r_i^c)]}{\dot{V}_2} \quad (2.59)$$

dando origem à equação 2.60.

$$\frac{dC_2}{dz} + AC_2(z) - BC_4(z) = 0 \quad (2.60)$$

Em função do resultado líquido deste balanço, as equações que o traduzem são diferentes. Quando $w(r_i^c) \geq v(r_i^c)$, então $A = A' + B'$ e $B = B' + C'$, caso contrário, $A = A' + B' - C'$ e $B = B'$.

Zona de Captura: A captura de partículas, no caso do ciclone concentrador, passa por considerar que as partículas voltam a ser injectadas no ciclone de fluxo invertido, com velocidade igual à do fluido que recircula, o que se traduz no facto de não existir zona de captura no ciclone concentrador.

Zona Axial Central: Nesta zona, o balanço de material é traduzido pela equação 2.61.

$$\frac{dC_4}{dz} + DC_4(z) - EC_2(z) = 0 \quad (2.61)$$

À semelhança do balanço estabelecido para a zona 2, este depende do balanço entre a velocidade terminal das partículas e a velocidade radial do gás. Quando $w(r_i) \geq u(r_i)$, então $D = D' + E'$ e $E = D'$, caso contrário, $D = D'$ e $E = D' - E'$. As constantes D' e E' são obtidas pelas equações 2.62 e 2.63.

$$D' = \frac{2\pi r_i^c D_{turb}}{(r_a^c - r_i^c) \dot{V}_4} \quad (2.62)$$

$$E' = \frac{2\pi r_i^c [w(r_i^c) - u(r_i^c)]}{\dot{V}_4} \quad (2.63)$$

A equação 2.61 pode ser reescrita conforme 2.64.

$$C_2(z) = \frac{\frac{dC_4}{dz} + DC_4(z)}{E} \quad (2.64)$$

Diferenciando e substituindo $C_2(z)$ e $\frac{dC_2}{dz}$ na equação 2.61, obtém-se a equação 2.65.

$$\frac{d^2C_4}{dz^2} + (D + A) \frac{dC_4}{dz} + (AD - BE)C_4(z) = 0 \quad (2.65)$$

Esta equação é uma equação diferencial linear de segunda ordem, com as raízes dadas pela equação 2.66.

$$\lambda_{1,2} = -\left(\frac{D+A}{2}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{D+A}{2}\right)^2 - (AD - BE)} \quad (2.66)$$

As concentrações de partículas nas zonas 2 e 4 são dadas pelas equações 2.67 e 2.68.

$$C_2(z) = \frac{1}{E} [R_1 \lambda_1 \exp [\lambda_1 (z - ss_{in}^c)] + R_2 \lambda_2 \exp [\lambda_2 (z - ss_{in}^c)]] + \frac{D}{E} [R_1 \lambda_1 \exp [\lambda_1 (z - ss_{in}^c)]] \quad (2.67)$$

$$C_4(z) = R_1 \lambda_1 \exp [\lambda_1 (z - ss_{in}^c)] + R_2 \lambda_2 \exp [\lambda_2 (z - ss_{in}^c)] \quad (2.68)$$

Considerando as condições fronteira apresentadas pelas equações 2.69 e 2.70,

$$C_2(ss_{in}^c) = C_1(ss_{in}^c) \quad (2.69)$$

$$C_4(ss_{in}^c) = C_1(ss_{in}^c) \quad (2.70)$$

obtêm-se os valores das constantes gerais, expressos nas equações 2.71 e 2.72.

$$R_1 = C_1(ss_{in}^c) - R_2 \quad (2.71)$$

$$R_2 = C_1(ss_{in}^c) + \frac{E - D - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (2.72)$$

Eficiência de captura do sistema com ciclone concentrador

A eficiência de captura (em função da concentração) é dada através de um balanço de material entre a entrada e a zona 4, traduzido pela equação 2.73.

$$\eta_R = 1 - \frac{C_4(H - ss_{out}^c) \dot{V}_4}{C_0 \dot{V}_0} \quad (2.73)$$

Obtenção dos resultados em estado estacionário

Apesar das semelhanças óbvias entre os modelos de Mothes e Löffler (1988) (para o ciclone) e Salcedo et al. (2007) (para o ciclone concentrador), o acoplamento dos dois modelos é feito através do impacto da captura do ciclone concentrador na distribuição processada pelo ciclone de fluxo invertido.

Tendo isto presente, a forma de solucionar este problema passa por um processo iterativo, onde a distribuição à entrada é alterada após cada passagem no ciclone de fluxo invertido e ciclone concentrador. A análise de convergência do sistema é feita sobre a variação da distribuição processada pelo ciclone de fluxo invertido, considerando que o sistema convergiu quando esta varia menos do que 0.01%, sendo este valor obtido (em situações normais), em poucas iterações (≈ 10).

2.4 Precipitação Electrostática

Tendo presente que o sistema em estudo tem a capacidade de operar como um sistema semelhante a um de precipitação electrostática, apresenta-se uma contextualização histórica desta tecnologia. Apresenta-se ainda a evolução dos modelos de previsão da performance dos diferentes precipitadores electrostáticos, culminando com a apresentação do modelo usado para avaliar o impacto do campo eléctrico na captura das partículas no ciclone concentrador, obtido pela combinação de modelos propostos por vários autores.

2.4.1 Contextualização histórica da precipitação electrostática

As primeiras observações do fenómeno de atracção electrostática de partículas é um fenómeno que data de 600 a.C. quando os antigos gregos notaram a atracção de pequenas partículas de âmbar pelas peles dos animais. Durante o século XVIII, esta observação foi gravada por Gilbert (1900), que constatou que as partículas de fumo sofriam atracção quando atravessadas por um campo eléctrico. Ainda antes disso, durante o século XVII, Benjamin Franklin registou os primeiros avanços no estudo do efeito Corona ou da descarga abrupta de energia. Ainda nesta área e nesta altura, Beccaria (1772) fez alguns avanços no estudo de descargas eléctricas através de gases com fumo.

Em 1824, Hohlfeld (1824) realizou uma experiência de limpeza de nevoeiro salino dentro de um frasco, usando para isso corrente eléctrica através de um fio. Guitard (1850) repetiu esta experiência, com condições ligeiramente diferentes, conseguindo

também resultados semelhantes aos anteriores. No entanto, nenhuma destas experiências conseguiu simular correctamente nenhum caso prático de estudo de precipitação electrostática, tendo sido rapidamente esquecidas.

Mais tarde, em 1883, estas foram trazidas à luz pelos estudos desenvolvidos nesta área por Lodge (1886), quando este publicou na revista *Nature* que pensava ser possível limpar o ar atmosférico de nevoeiro salino e fumos. Em consequência desta afirmação, foi feita a primeira patente na Grã-Bretanha de um precipitador electrostático, tendo este sido construído por Hutchings (1885) com supervisão de Lodge. No entanto, este equipamento não se mostrou muito eficaz na captura do fumo escolhido (óxido de chumbo), uma vez que este se trata de um fumo composto por partículas muito finas e com alta resistividade eléctrica.

Simultaneamente, na Alemanha, surgiu uma outra proposta de precipitador electrostático, patenteada por Moeller (1884), sem que haja indícios desta ter sido usada de uma forma comercial.

Apenas em 1907 é que este equipamento surge como alternativa viável à limpeza de gases industriais, através do pioneirismo de Cottrell (1911), que reconheceu que em relação ao trabalho prévio de Lodge, Walter e Hutchings, seria necessário fazer uma adaptação de uma fonte de alta-voltagem mais estável, dando origem ao desenvolvimento do rectificador mecânico sincronizado.

A partir deste momento na História, com o controlo das emissões gasosas de ácido sulfúrico, os precipitadores electrostáticos surgiram como alternativa viável para outros gases industriais, havendo uma grande diversificação dos produtos onde estes foram aplicados a partir da segunda metade do século XX.

Ao longo do tempo foram sendo introduzidas melhorias em relação ao funcionamento dos precipitadores electrostáticos, no sentido de melhorar as suas performances. Uma das primeiras melhorias foi a descoberta que através de um arrefecimento progressivo dos gases e com o acoplamento a jusante de um segundo precipitador electrostático, era possível separar componentes puros (sólidos ou líquidos) de uma mistura gasosa, tendo sido este um método muito usado na recuperação de produtos com valor comercial. Outro desenvolvimento relevante passou pela diminuição da resistividade de alguns compostos com elevada resistividade eléctrica, apenas pela injeção de agentes (como o dióxido de enxofre) que condicionassem a resistividade eléctrica da mistura do agente com os fumos a recolher no precipitador electrostático.

2.4.2 Bases teóricas da precipitação electrostática

Para separação de partículas através de precipitação electrostática são necessários três passos:

1. Carregamento das partículas;
2. Captura das partículas carregadas;
3. Remoção das partículas capturadas.

Para a configuração dos sistemas estudados, o último ponto não se aplica uma vez que são relevantes apenas os dois primeiros e a etapa de remoção de partículas é feita no ciclone.

Um dos requisitos do fenómeno de carregamento de partículas (e correspondente precipitação electrostática) é a geração de elevadas quantidades de iões, para que estas carreguem as partículas de aerossol. Este processo é designado por formação de uma Corona, que é resultado de uma grande aceleração de electrões que colidem moléculas de gás, gerando um ião positivo e mais um electrão livre para carregar outras moléculas.

Assim sendo, este processo funciona à semelhança de uma “avalanche” de electrões, que é acompanhado fisicamente por uma zona de maior brilho, chamada a zona de Corona.

O início deste processo é dependente da energia de ionização do gás, de tal forma que os electrões disponíveis para colisão tenham de ter energia suficiente para retirar um electrão às moléculas de gás. No entanto, existem outras variáveis com impacto no efeito Corona, como por exemplo, a emissão de electrões secundários do fio de descarga por impacto dos iões positivos entretanto formados.

Variáveis com impacto no efeito Corona

A combinação da geometria do eléctrodo, da geometria do precipitador e as condições operatórias tem influência no efeito Corona.

Considerando o caso particular de um eléctrodo cilíndrico, e focando no diâmetro do eléctrodo, poder-se-á dizer que a voltagem para início de Corona diminui conforme este diminui.

Quanto ao diâmetro do precipitador (no caso trata-se de um cilindro), este tem uma influência ligeira na voltagem inicial necessária, tendo no entanto grande impacto (negativo) na intensidade de corrente de Corona. Este facto é justificado pelo aumento da energia necessária para ionizar as partículas de gás presentes no cilindro, prejudicando o

número de electrões livres na Corona, para carregar as partículas de aerossol, diminuindo por isso a densidade de corrente de Corona. De facto, eléctrodos muito afastados fazem cair o campo eléctrico para valores incapazes de sustentar o efeito Corona.

Para estudar o efeito da alteração das condições operatórias, pode-se fazer o estudo do impacto directo da massa volúmica do fluido (ρ) no efeito Corona, uma vez que esta relaciona o efeito da pressão (p) e da temperatura (T) na densidade relativa do gás (δ) conforme é traduzido na equação 2.74.

$$\delta = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{p_2}{p_1} \frac{T_1}{T_2} \quad (2.74)$$

Ainda referindo as condições operatórias, particularizando no potencial aplicado, os limites de operação estão definidos inferiormente pela voltagem necessária para que o fenómeno ocorra e superiormente pelo potencial que induza a existência de faísca entre o eléctrodo de descarga e o cilindro (ligado à terra).

No caso limite do potencial de faísca, este é directamente proporcional ao aumento do diâmetro do cilindro, o que permite afirmar que se têm que combinar, de uma forma optimizada, os diâmetros do eléctrodo e do cilindro.

Apenas como referência nesta fase, é relevante referir que a presença de partículas sólidas (ou líquidas) no precipitador influencia o efeito Corona, mas este facto será descrito em maior detalhe à frente.

2.4.3 Modelo de previsão do funcionamento da precipitação electrostática

Tendo em conta os princípios enunciados acerca do efeito Corona, surgiram vários modelos para prever o comportamento dos precipitadores electrostáticos. Assim sendo, passa-se a apresentar os princípios básicos usados no modelo PACyc.

O modelo usado foi desenvolvido segundo as teorias propostas por White (1963), Oglesby (1978) e Parker (1997) traduzido na seguinte formulação semi-empírica:

Geração da Corona

O campo eléctrico necessário para iniciar o processo de ionização contínuo depende da energia de ionização das espécies gasosas envolvidas assim como o percurso livre molecular médio. Este último é função do estado do gás, sendo por isso o campo eléctrico para formação da Corona função da densidade do gás.

Tendo em conta a complexidade da descrição dum sistema a uma escala molecular, Peek (1929) propôs uma relação semi-empírica, onde o campo E_0 é traduzido em função da densidade relativa do gás (δ , dado pela equação 2.74), do raio do eléctrodo (r_{SE}) e de duas constantes empíricas A^e e B^e . Essa relação é apresentada pela equação 2.75.

$$E_0 = A^e \delta + B^e \sqrt{\frac{\delta}{r_{se}}} \quad (2.75)$$

Para condições de pressão e temperatura normais ($T = 273\text{K}$ e $p = 1\text{bar}$), as constantes A^e e B^e adoptam os valores traduzidos na expressão 2.76

$$A^e = 3.2 \times 10^6 \text{ V/m} \quad B^e = 9 \times 10^4 \text{ V/m}^{\frac{1}{2}} \quad (2.76)$$

A voltagem para superar o campo crítico para haver a geração do efeito Corona (V_0) é função do campo (E_0) e de características geométricas do precipitador, e uma forma de cálculo dessa voltagem é apresentada na equação 2.77. Como no caso em estudo, o precipitador tem uma geometria cilíndrica, o raio (r_{NE}) é o parâmetro geométrico que caracteriza o precipitador.

$$V_0 = E_0 r_{SE} \ln \frac{r_{NE}}{r_{SE}} \quad (2.77)$$

Existe ainda a outra situação limite que é a indução de faísca entre o eléctrodo e a terra. O campo limite que induz faísca é calculado pela equação 2.78, onde T é a temperatura absoluta, p é a pressão absoluta em hPa e Hum é a percentagem volúmica de humidade no fluido.

$$\begin{aligned} \frac{V_{faísca}}{r_{NE}} = & 5.075 \times 10^5 \left(\frac{255.5}{T} \frac{p}{1013.25} \right)^{1.48} \\ & + \left(3.174 \times 10^6 + 3.192 \times 10^6 \frac{p}{1013.25} \right) \times Hum \times \frac{302}{T} \frac{p}{1013.25} \end{aligned} \quad (2.78)$$

A relação entre a corrente obtida através da condução iónica no gás e o potencial aplicado é directamente proporcional ao campo eléctrico aplicado, e a constante de proporcionalidade é referida como mobilidade iónica (b_{elec}). Tendo em conta que as expressões para o cálculo da mobilidade iónica baseadas na teoria cinética dos gases ainda não conduzem a resultados válidos, considera-se válida uma expressão empírica que considera que a mobilidade eléctrica equivalente do ar seco, para iões negativos, é inversamente proporcional à densidade relativa do gás, apresentada na equação 2.79.

$$b_{elec} = \frac{2 \times 10^{-4} \frac{m^2}{Vs}}{\delta} \quad (2.79)$$

A corrente total obtida (i_{tot}) é função da área total de captura ($A_{NE,tot}$) do precipitador electrostático. Assim sendo, a densidade de corrente pode ser expressa em função da área total de captura (ver equação 2.80) ou do comprimento do fio ($L_{SE,tot}$) (ver equação 2.81).

$$j_{NE} = \frac{i_{tot}}{A_{NE,tot}} \quad (2.80)$$

$$j_{SE} = \frac{i_{tot}}{L_{SE,tot}} \quad (2.81)$$

Considerando o caso particular em estudo neste trabalho, o caso de um precipitador electrostático com geometria cilíndrica, é possível estabelecer que o comprimento do tubo (L_{NE}) é aproximadamente igual ao comprimento do fio, sendo possível estabelecer que a densidade de corrente por unidade de comprimento de fio é função do comprimento do precipitador, conforme a equação 2.82,

$$j_{SE} \approx \frac{i_t}{L_{NE,tot}} \quad (2.82)$$

onde i_t é intensidade de corrente por tubo, que no caso é igual a i_{tot} .

É possível estabelecer a relação da densidade de corrente em função do comprimento do precipitador (equação 2.83),

$$j_{NE} = \frac{i_t}{2\pi r_{NE} L_{NE,tot}} \quad (2.83)$$

e relacionar as duas densidades de corrente como apresentado na equação 2.84.

$$j_{NE} = \frac{j_{SE}}{2\pi r_{NE}} \quad (2.84)$$

Generalizando a informação acerca da dependência da densidade de corrente do potencial aplicado, é possível traduzir a intensidade de corrente ($i_{tot} = i_t = i$) em função da voltagem através da equação 2.85,

$$V = V_0 + r_{SE} E_0 \times \left[\sqrt{1 + \frac{i r_{NE}^2}{2 \pi \epsilon_0 b_{elec}(\delta) E_0^2 r_{SE}^2}} - 1 - \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{i r_{NE}^2}{2 \pi \epsilon_0 b_{elec}(\delta) E_0^2 r_{SE}^2}}}{2} \right] \quad (2.85)$$

onde $\epsilon_0 = 8.86 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$ é a permissividade eléctrica no vácuo. Analisando esta expressão é possível estabelecer que conforme se aumenta o rácio $\frac{r_{NE}}{r_{SE}}$ (mantendo as outras variáveis constantes), diminui a intensidade de corrente obtida.

Considerando que usualmente as condições de operação dos precipitadores electros-táticos são apenas referidas como o campo aplicado no precipitador, este de facto é função da posição radial. Assim sendo, a equação 2.86 traduz a variação do campo em função da distância ao fio.

$$E(r) = \sqrt{\frac{r_{NE} \cdot j_{NE}}{\epsilon_0 b_{elec}(\delta)} + \frac{r_{SE}}{r} \left[E_0^2 - \frac{r_{NE} \cdot j_{NE}}{\epsilon_0 b_{elec}(\delta)} \right]} \quad (2.86)$$

Existem ainda várias outras variáveis com impacto no funcionamento do precipitador. Ainda que estas tenham sido já objecto de estudos aprofundados (Cooperman, 1956; Penney e Matick, 1957; Thomas e Wong, 1958; White, 1952), apresenta-se na Tabela 2.4 as gamas usuais dessas mesmas variáveis.

Tabela 2.4 Gamas mais comuns das variáveis com impacto na Corona

Variável	Gama	Unidade
Pressão	0.5 – 3.5	atm
Temperatura	10 – 160	°C
Diâmetro do fio	0.2 – 10	mm
Diâmetro do recirculador	0.05 – 0.20	m
Composição do fluido	N ₂ , O ₂ , CO ₂ , H ₂ O, ar, ...	
Tipo de voltagem	contínua, meia-onda, onda	
Voltagem	0 – 100	kV

É possível afirmar, de uma forma muito sucinta, que o efeito Corona aumenta quando:

- o diâmetro do fio diminui;

- o diâmetro do precipitador diminui;
- a pressão diminui;
- a temperatura aumenta;
- a afinidade electrónica do gás aumenta;
- a voltagem aplicada aumenta;

No entanto, embora estas variáveis sejam muito influentes no comportamento do precipitador, uma das variáveis de maior relevância para o sistema integrado ciclone/-precipitador, é o impacto da presença de partículas no precipitador, cuja concentração, tamanho, velocidade, etc., depende do comportamento do ciclone.

Num sistema tradicional, a presença das partículas para o efeito de Corona no precipitador, faz-se sentir de 3 formas distintas:

1. Na carga efectiva das partículas de fluido;
2. Deposição nos eléctrodos de captura;
3. Deposição no fio gerador de Corona.

No sistema estudado, não se pretende que exista deposição nos eléctrodos de captura, uma vez que o objectivo do precipitador passa por reinjectar partículas no fluxo de entrada no ciclone de fluxo-invertido.

Com a presença de partículas dispersas no fluido, estas também sofrem a acção do campo eléctrico, sendo carregadas electricamente. Assim sendo, como consequência da presença das partículas no precipitador, o campo eléctrico perto do fio fica enfraquecido, originando também uma Corona resultante menor.

É possível considerar quantitativamente este efeito, de forma a que a performance do precipitador seja prevista de uma forma mais precisa através do modelo. Para tal, algumas simplificações são introduzidas, sendo possível optar por uma de duas estratégias mais comuns: considerar que a carga no precipitador é uniforme em qualquer secção do precipitador e que esta decresce lentamente ao longo do eixo axial deste; considerar que a carga é proporcional ao campo de precipitação electrostática para qualquer secção e que esta decresce lentamente ao longo do eixo axial deste. Neste trabalho a segunda aproximação foi descartada uma vez que a primeira conduziu a resultados de qualidade.

Aprofundando em maior detalhe a primeira aproximação, é possível estabelecer à semelhança da equação 2.77, que para o caso sem carga das partículas no espaço do

precipitador, que para um dado potencial (V_0), temos um campo de início de Corona (E_0) correspondente. É possível afirmar que no caso de as partículas estarem carregadas, a mobilidade eléctrica destas é menor que a dos iões.

Esta afirmação permite concluir que um dos impactos primários das partículas no precipitador é a redução do campo eléctrico perto do fio e consequente aumento de potencial efectivo de Corona.

É possível traduzir o novo valor de potencial de Corona (V'_0) em função do valor do potencial efectivo de Corona quando limpo (V_0), considerando para isso a concentração de partículas (C) e a área superficial das partículas (A_{sup}), conforme a equação 2.87,

$$V'_0 = V_0 + \pi \rho_0 r_{NE}^2 \quad (2.87)$$

onde a densidade de partículas carregadas por unidade de volume (ρ_0) é dada pela equação 2.88.

$$\rho_0 = \frac{3 E_0 A_{sup} C}{4\pi} \quad (2.88)$$

Esta informação pode ser apresentada sob a forma de supressão de corrente em função da concentração das partículas. Considerando que a V_0 corresponde uma intensidade de corrente quando o sistema está limpo ($i_{inicial}$) e que a V'_0 corresponde uma intensidade de corrente quando o sistema tem partículas (i_{final}), é possível calcular a supressão de corrente percentual (Sup) pela equação 2.89.

$$Sup(\%) = \left(\frac{i_{inicial} (mA) - i_{final} (mA)}{i_{inicial} (mA)} \right) \times 100 \quad (2.89)$$

Nestes casos, o impacto deste tipo de deposição é uma "deslocação" da curva potencial vs. corrente para voltagens mais baixas, conforme se evidencia na Figura 2.9.

Estudando em maior detalhe a deposição de partículas no fio, quando esta ocorre em pequena escala, com pequenos depósitos no fio, é possível que exista a geração de campos de elevada intensidade, mesmo a reduzidas voltagens.

Quando existe deposição considerável de partículas maiores ao longo de todo o fio, a tendência é o aumento da supressão de corrente, devido não só ao aumento do diâmetro efectivo do fio mas também ao aumento da resistividade (e consequente diminuição da voltagem). Além disso, este tipo de deposição normalmente não é uniforme, dando origem a geração de uma Corona não uniforme ao longo do precipitador electrostático, prejudicando de uma forma substancial a eficiência deste.

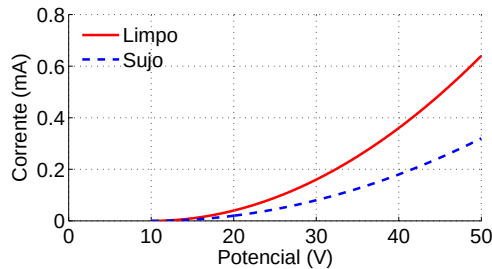


Figura 2.9 Desvio típico da curva potencial vs. corrente devido à presença de partículas

Carregamento eléctrico das partículas

A razão subjacente à aplicação de um campo eléctrico no precipitador é a obtenção de partículas carregadas electricamente, uma vez que as forças de repulsão das partículas (que favorecem a separação) são directamente proporcionais à carga das mesmas.

O tipo de carga das partículas (positiva ou negativa) é normalmente dependente do tipo de processo onde este tipo de tecnologia é aplicado, sendo que, seja qual for a polaridade usada (tendo presente que ambos os tipos conduzem a resultados equivalentes para campos equivalentes), um campo unipolar é muito mais eficiente do que um campo ambipolar. No sistema abordado neste trabalho, o campo gerado tem polaridade negativa, dando origem a uma Corona negativa.

No desenvolvimento da teoria de carga das partículas, é assumido que estas são carregadas entre o limite da Corona e a superfície onde se considera que a partícula foi colectada. Adiante neste trabalho, a definição desta superfície será objecto de referência mais detalhada.

Consideram-se normalmente dois tipos de mecanismos como responsáveis pelo carregamento das partículas: campo eléctrico e difusão. Embora ambos os mecanismos ocorram simultaneamente, estes são preponderantes para partículas de tamanhos diferentes. Assim sendo, pode-se dizer que para partículas com raios superiores a $0.5\mu\text{m}$, o campo eléctrico é o mecanismo dominante, enquanto para partículas com raios inferiores a $0.2\mu\text{m}$, a difusão é o mecanismo dominante. Na zona intermédia, ambos os mecanismos contribuem significativamente para o carregamento das partículas, sendo de considerar ambos simultaneamente.

Carregamento por campo eléctrico: Vários autores (Liu e Kapadia, 1978; Liu e Yeh, 1968; Murphy et al., 1959; Sato, 1987; Smith e McDonald, 1976) debruçaram-se sobre estes casos, tendo adoptado diversas estratégias, e chegado a uma conclusão comum:

em nenhum dos casos era possível obter uma solução analítica global.

Particularizando, Oglesby (1978) propõe que a carga de saturação de uma partícula é dada pela equação 2.90,

$$Q_p^\infty = 3\pi \frac{k}{k+2} \epsilon_0 E d_p^2 \quad (2.90)$$

onde k é a constante dieléctrica das partículas, ϵ_0 é a permissividade no vácuo, d_p o diâmetro da partícula e E o campo eléctrico aplicado.

É consensual entre os diversos autores, que o tempo característico de carga das partículas (τ_Q) é dado pela equação 2.91,

$$\tau_Q = \frac{4 \epsilon_0 b_{elec}(\delta) E}{N_0} \approx \frac{4 \epsilon_0 E}{j_{NE}} \quad (2.91)$$

onde N_0 é concentração total de iões no gás, que está relacionada com a densidade electrónica no precipitador (j_{NE}) pela equação 2.92.

$$N_0 = \frac{j_{NE}}{E b_{elec}(\delta)} \quad (2.92)$$

A carga efectiva das partículas ao final de dado instante de tempo (t) em função da carga de saturação, considerando apenas o carregamento por campo eléctrico, é traduzida pela equação 2.93.

$$Q_p(t) = Q_p^\infty \frac{t}{t + \tau_Q} \quad (2.93)$$

Carregamento por difusão eléctrica: Considerando a difusão como o único mecanismo responsável por carregar electricamente as partículas, é possível deduzir expressões equivalentes para determinar a carga das partículas, considerando como aproximação, que esse mecanismo actua independentemente da carga devido ao campo eléctrico.

Este mecanismo de carga resulta dos movimentos aleatórios de partículas e iões e das suas colisões. Assim sendo, durante estas colisões são formados dipolos induzidos, transferindo carga dos iões para as partículas.

Recorrendo à teoria cinética dos gases, a densidade molecular de um gás (N) em função da temperatura absoluta (T), num campo com um dado potencial (V), é dada pela equação 2.94,

$$N = N_0 \exp \left(\frac{V}{k_B T} \right) \quad (2.94)$$

onde N_0 é número médio de moléculas por unidade de volume e k_B é a constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$).

Considerando que o potencial é função da distância radial do centro da partícula a uma posição radial r , estabelece-se a relação 2.95.

$$V = -\frac{qE}{r} \quad (2.95)$$

Combinando as equações 2.94 e 2.95, é possível calcular o número de partículas com carga na superfície da partícula, através da equação 2.96,

$$N = N_0 \exp \left(-\frac{qE}{r_p k_B T} \right) \quad (2.96)$$

onde q é a carga da partícula e r_p é o seu raio.

Segundo a teoria cinética de gases, o numero de iões que colidem com a superfície da partícula por unidade de tempo, é dado pela equação 2.97,

$$\frac{dn}{dt} = \pi r_p^2 N v_{rms} \quad (2.97)$$

onde v_{rms} é a velocidade média quadrática do fluido (velocidade térmica), que em função da temperatura, e considerando a massa da partícula (m_p), é dada pela equação 2.98.

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{8 k_B T}{\pi m_p}} \quad (2.98)$$

Combinando as equações 2.96 e 2.97, integrando em ordem ao tempo, é possível calcular a carga efectiva das partículas ao final de dado instante de tempo (t) considerando apenas o carregamento por difusão iónica, conforme a equação 2.99.

$$Q_p(t) = \frac{r_p k_B T}{E^2} \log \left(1 + \frac{\pi r_p v N_0 E^2 t}{k_B T} \right) \quad (2.99)$$

Combinação dos mecanismos: Uma aproximação rudimentar feita para ter a noção dos valores de carga em situações ideais, é considerar que a carga das partículas ao final de um dado tempo (t) é resultado da soma da carga por cada um dos mecanismos independentemente, sendo esta aproximação obtida através da combinação das equações 2.93 e 2.99, resultando a equação 2.100.

$$Q_p(t) = Q_p^\infty \frac{t}{t + \tau_Q} + \frac{r_p k_B T}{E^2} \log \left(1 + \frac{\pi r_p v N_0 E^2 t}{k_B T} \right) \quad (2.100)$$

Tendo presente que as expressões apresentadas anteriormente são obtidas considerando os mecanismos separadamente, e sabendo que tal não é o que de facto acontece, surgiu a necessidade de obter uma solução aproximada, considerando ambos os efeitos simultaneamente.

Assim sendo, surge o modelo de carga proposto por Cochet (1961), que usando uma solução numérica, permite de uma forma simples, estimar a carga das partículas em função do seu tamanho.

Cochet (1961) propõe que a carga de saturação de uma partícula é dada pela equação 2.101,

$$Q_{p,Cochet}^\infty = \left[\left(1 + \frac{2\lambda}{d_p} \right)^2 + \frac{2}{1 + \frac{2\lambda}{d_p}} \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right] \pi \epsilon_0 d_p^2 E \quad (2.101)$$

onde λ é o percurso livre molecular médio, ϵ_r é a permissividade eléctrica relativa das partículas, ϵ_0 é a permissividade eléctrica do vácuo, d_p o diâmetro da partícula e E o campo eléctrico aplicado.

Considerando o tempo característico de carga apresentado na equação 2.91, obtém-se a equação 2.102

$$Q_{p,Cochet}(t) = Q_{p,Cochet}^\infty \frac{t}{t + \tau_Q} \quad (2.102)$$

Migração das partículas

O conceito fundamental na separação de partículas em meios ionizados é o facto da trajectória da partícula ser afectada pela carga desta e pela direcção do campo imposto. Quando as forças electrostáticas dominam, as partículas deslocam-se em direcção aos eléctrodos de captura, com velocidades governadas pela combinação das forças viscosas e electrostáticas.

Cinética das partículas carregadas: Considerando o conjunto das forças que actuam numa partícula, é possível estabelecer, reconhecendo a validade das leis de Newton, em termos vectoriais, que todas as forças que actuam na partícula são apresentadas pelas equações 2.103 a 2.106.

1. Força gravítica

$$\vec{F}_g = m_p \vec{g} \quad (2.103)$$

2. Força eléctrica

$$\vec{F}_e = q \vec{E} \quad (2.104)$$

3. Força viscosa

$$\vec{F}_\mu = 6 \pi r_p \mu \vec{w} \quad (2.105)$$

4. Força inercial

$$\vec{F}_i = m_p \frac{d\vec{w}}{dt} \quad (2.106)$$

Considerando um referencial bidimensional fixo, levando em linha de conta que em todas as direcções o somatório das forças que actuam na partícula é igual a zero e que a força gravítica é desprezável em relação às restantes, pode-se estabelecer (em termos algébricos) o balanço de forças traduzido na equação 2.107,

$$\sum F_x = F_e - F_\mu - F_i = 0 \quad (2.107)$$

considerando que a força viscosa e inercial actuam no sentido contrário à força eléctrica, para o movimento das partículas.

Substituindo as equações 2.104, 2.105 e 2.106 na equação 2.107 e rearranjando, obtém-se a equação 2.108 que permite calcular a velocidade da partícula.

$$\frac{d\vec{w}}{dt} + \frac{6 \pi r_p \mu}{m} \vec{w} = \frac{q}{m_p} \vec{E} \quad (2.108)$$

Usando uma formulação algébrica da equação 2.108, integrando e explicitando em ordem a w , obtém-se a equação 2.109, que relaciona a velocidade da partícula, em função do tempo de carga (t).

$$w = \frac{q E}{6 \pi r_p \mu} \left[1 - \exp \left(- \frac{6 \pi r_p \mu}{m_p} t \right) \right] \quad (2.109)$$

Ainda que na secção referente à carga das partículas, sejam apresentados dois tipos de mecanismos de carga diferentes, considera-se que a expressão apresentada para o cálculo da velocidade da partícula é válida para a combinação dos mecanismos, sendo que é possível deduzir expressões de velocidade diferentes da anterior para os casos específicos onde um dos mecanismos seja o dominante.

Para o âmbito deste trabalho, a expressão apresentada ainda pode sofrer uma simplificação adicional, tendo presente que:

- Para as partículas com diâmetros maiores do que $50\mu\text{m}$ o tempo de aceleração das partículas é reduzido comparativamente com o tempo de residência no precipitador;
- Para as partículas com diâmetros menores do que $1\mu\text{m}$, o tempo de residência é muito longo, comparativamente com o tempo de carga das partículas

Assim, pode-se anular o termo exponencial da equação 2.109 (o que é o mesmo que negligenciar o impacto das forças inerciais na velocidade da partícula) ficando a velocidade terminal da partícula a ser determinada pela equação 2.110.

$$w = \frac{q E}{6 \pi r_p \mu} \quad (2.110)$$

Migração em meio laminar: Embora estas condições raramente se encontrem em precipitadores electrostáticos reais, tratando-se claramente de um caso académico, este permite tirar algumas conclusões em termos de valores de orientação para o comportamento de um precipitador electrostático.

Para este tipo de escoamento, normalmente considera-se que o valor máximo de velocidade está associado ao centro da tubagem (no caso, do precipitador). No entanto, devido ao facto de se tratar de um sistema com algum desconhecimento relativamente ao perfil de velocidades, como uma primeira aproximação, pode-se considerar que o fluido tem escoamento pistão, com uma velocidade uniforme (v), condições que permitem dizer que a velocidade de migração das partículas (w) é inversamente proporcional ao comprimento do precipitador, conforme se apresenta na equação 2.111,

$$L w = v d \quad (2.111)$$

onde L é o comprimento de colecção total do precipitador e d é a distância que as partículas têm que percorrer até serem capturadas.

Migração em meio turbulento: Na prática, quase todos os precipitadores electrostáticos operam em condições turbulentas, o que faz com que seja impossível o cálculo de trajectórias determinísticas das partículas.

Na tentativa de estimar a performance (em termos de captura) dos precipitadores electrostáticos, Deutsch (1922) derivou a equação 2.112, que relaciona as condições do fluido, com as velocidades das partículas quando carregadas.

$$\eta_e = 1 - \exp\left(-\frac{A}{V_0}w\right) \quad (2.112)$$

Na equação 2.112, A é a área específica de captura, V_0 é o caudal volúmico à entrada do precipitador electrostático e w é a velocidade de migração das partículas, e o seu desenvolvimento foi feito considerando válidas as seguintes simplificações:

1. As partículas são consideradas completamente carregadas quando entram no precipitador;
2. As condições de dispersão e turbulência fazem com que as partículas estejam uniformemente distribuídas em qualquer secção recta do precipitador;
3. A velocidade da corrente gasosa não afecta a velocidade de migração das partículas;
4. O movimento das partículas devido ao arrasto é feito no regime de Stokes;
5. A partícula move-se sempre à sua velocidade terminal eléctrica;
6. As partículas estão suficientemente separadas para que as forças de repulsão mútuas sejam negligenciáveis;
7. O efeito das colisões entre iões e moléculas de gás electricamente neutras pode ser negligenciado;
8. Não existe erosão, reinjecção de partículas, zonas preferências de escoamento ou Corona inversa (injecção de iões de polaridade contrária à do fio de descarga, devido à resistividade das partículas)

No entanto, de facto existem vários factores que influenciam a captura de partículas num precipitador electrostático, conforme se apresenta em seguida:

- Qualidade do caudal de gás;
- Reentrada de partículas no precipitador;
- Perdas no precipitador devido a deposição em locais de difícil acesso, como zonas estagnantes ou mortas;
- Tempo de carga insuficiente para carregar completamente as partículas;
- Características das partículas: tamanho e concentração.

Assim sendo, no sentido de melhorar os resultados de captura previsto pela equação de Deutsch, vários autores fizeram modificações, considerando alguns dos efeitos negligenciados por Deutsch, como Cooperman (1969). Ainda que essas equações descrevam de uma forma mais detalhada o fenómeno de captura através de precipitação electrostática, considera-se que a equação de Deutsch produz resultados com qualidade suficiente para descrever o sistema estudado neste trabalho.

Cálculo da eficiência de captura considerando os mecanismos competitivos

Levando em linha de conta que este sistema se encontra a jusante de um sistema de ciclones com recirculação parcial de gases e partículas, propõe-se duas interfaces de separação, no que diz respeito à captura de partículas através de precipitação electrostática:

- Parede do recirculador;
- Cilindro virtual central, com diâmetro igual à saída de gás para a chaminé

Essas duas interfaces são apresentadas na Figura 2.10 (a azul com linha interrompida densa a parede do recirculador e a vermelho com linha interrompida espaçada o cilindro virtual central).

Considerando o primeiro caso, a expressão que calcula a eficiência do sistema de precipitação é dada pela equação 2.113, em tudo equivalente à equação 2.112.

$$\eta_{e,modelo1} = 1 - \exp\left(-\frac{2\pi r_{NE} L_{NE}}{4 V_0} w\right) \quad (2.113)$$

Considerando o caso do cilindro central virtual como interface de separação, a expressão que calcula a eficiência do sistema de precipitação é dada pela equação 2.114,

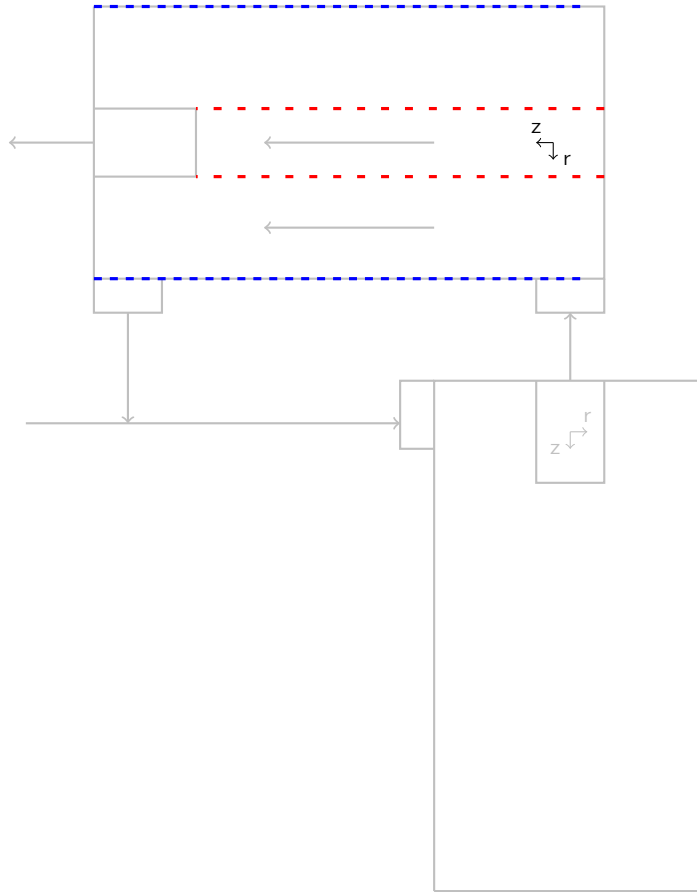


Figura 2.10 Representação das interfaces de separação propostas no modelo de captura por recirculação electrostática

$$\eta_{e,modelo2} = (1 - R_r) + R_r \left[1 - \exp \left(-\frac{2\pi D_e^c L_{SE}}{R_r \dot{V}_0} w \right) \right] \quad (2.114)$$

Convém referir que as condições óptimas de um dos mecanismos são adversas para o outro e vice-versa. Isso é observado com particular simplicidade no caso da concentração que, no caso do sistema com recirculação, quanto maior for, maior a eficiência de captura de partículas que este consegue. No entanto, para o sistema de precipitação electrostática, quanto maior a concentração, maior a supressão de corrente, o que implica que o mecanismo de precipitação electrostática piore a sua performance.

Considerando as equações 2.113 e 2.114 para o cálculo da eficiência de captura do precipitador e tendo presente que este está a acoplado ao sistema de ciclones com recirculação, pode-se considerar que a performance final do sistema é obtida através de contribuição isolada de cada um dos mecanismos descontada da sua interacção. Esta premissa traduz-se matematicamente na equação 2.115,

$$\eta = \eta_e + \eta_R^{loop} - \eta_e \cdot \eta_R^{loop} \quad (2.115)$$

onde η_e é calculado pela equação 2.112, considerando a equação 2.110 para calcular a velocidade das partículas carregadas electricamente. Conforme o tipo de mecanismo de carga das partículas levado em linha de conta, são usadas as equações 2.93 ou 2.99 para calcular a carga de cada partícula. A variável η_R^{loop} refere-se à eficiência global de captura *in-loop* do sistema com recirculação mecânica, dado pelo termo η_R da equação 2.50.

Assim sendo, recorrendo à expressão 2.115 poder-se-á estimar a eficiência global dos sistema composto por ciclone com recirculação parcial de gases quando no recirculador é aplicado um campo eléctrico.

2.5 Síntese

Neste capítulo fez-se uma revisão da evolução das diferentes componentes usadas para o desenvolvimento do modelo integrado **PACyc**.

Foram apresentados os modelos base das diferentes partes do modelo de previsão de captura de partículas. O modelo de Mothes e Löffler (1988) prevê as eficiências fraccionais de captura do ciclone, enquanto o modelo de Salcedo et al. (2007) prevê as eficiências fraccionais de captura do sistema com recirculação mecânica e o modelo obtido da combinação dos modelos de White (1963), Oglesby (1978) e Parker (1997) prevê o efeito do campo electrostático no ciclone recirculador e permite calcular as eficiências fraccionais do sistema composto por ciclone com recirculação onde é introduzido um campo eléctrico.

Pretendeu-se com este capítulo evidenciar as diferentes fórmulas de cálculo da eficiência de remoção de partículas conforme a configuração do sistema.

Nomenclatura

Variáveis comuns

η	Eficiência global
$\eta(d_p)$	Eficiência fraccional do diâmetro d_p
$\frac{D}{dt}$	Derivada Global
$\frac{d}{dz}$	Derivada em função da posição axial
μ	Viscosidade do Fluido (Pa s)
∇	Divergência
ν	Viscosidade cinemática do fluido (m ² /s)
$\vec{v}$	Velocidade (m/s)
ρ	Massa Volúmica do Fluido (kg/m ³)
ρ_p	Massa Volúmica das Partículas (kg _p /m ³ _p)
τ	Tensão de Corte (Pa)
d_p	Diâmetro das Partículas (m)
d_p	Diâmetro da partícula (m)
f	Factor de Fricção das partículas nas Paredes
g	Aceleração Gravitacional (m/s ²)
m_p	Massa da partícula (kg)
p	Pressão (Pa)
Pe_p	Peclet da partícula
r	Posição Radial (m)
Re_p	Reynolds da partícula
u_{in}	Velocidade de entrada do fluido (m/s)
z	Posição Axial (m)

Ciclone (secção 2.2)

β	Rácio entre a velocidade de entrada e tangencial do fluido
β^*	Rácio entre a velocidade de entrada e tangencial do fluido (sem fricção)
$\dot{m}_e$	Massa de partículas que entram no Ciclone (kg)
$\dot{m}_s$	Massa de partículas que saem no Ciclone (kg)
$\dot{m}_w$	Massa de Partículas que reentram no Ciclone (kg)
ϵ	Ângulo entre o Cone e a Direcção Axial do Ciclone (rad)
$\lambda_{ciclone}$	Coeficiente de Fricção da Parede do Ciclone
λ_{cone}	Coeficiente de Fricção da Parede do Cone
ϑ	Momento Angular do Fluido (N m s)
a	Altura da Entrada do Ciclone (m)
A	Parâmetro Simplificação
b	Largura da Entrada do Ciclone (m)
B	Parâmetro Simplificação

C	Parâmetro Simplificação
c_0	Concentração à entrada do Ciclone (kg/m^3)
$c_i(z)$	Concentração mássica zona i em função da posição axial (kg/m^3)
D	Diâmetro do Ciclone (m)
D	Parâmetro Simplificação
D_{turb}	Dispersão Turbulenta (m^2/s)
D_b	Diâmetro da Saída das Partículas (m)
D_e	Diâmetro da Saída do Ar (m)
H	Altura do Ciclone (m)
H_c	Altura do Cilindro do Ciclone (m)
h_z^*	Comprimento de ciclone onde ocorre a fricção das partículas com a parede (m)
$j_{i,j}$	Fluxo de Partículas da zona I para a zona J ($\text{kg}/\text{m}/\text{s}$)
j_i	Fluxo de Partículas na zona I ($\text{kg}/\text{m}/\text{s}$)
l	Comprimento característico do Vórtice do Ciclone (m)
m_1	Expoente/Constante de integração
m_2	Expoente/Constante de integração
r^*	Raio do Ciclone Equivalente (m)
R_1	Constante de integração
R_2	Constante de integração
r_e	Raio da Saída de Ar do Ciclone (m)
Re_{tr}	Reynolds do fluido considerando a velocidade de saída do gás
ss	Distância da Saída do Ar ao Topo do Ciclone (m)
u_r	Velocidade radial do fluido (m/s)
$u(r)$	Velocidade Tangencial do Fluido na posição r (m/s)
V_0	Caudal volúmico de entrada (m^3/s)
$V_{ciclone}$	Volume do Ciclone (m^3)
v_d	Velocidade média de descida do fluido no ciclone equivalente (m/s)
v_e	Velocidade de entrada do fluido (m/s)
$v(z)$	Caudal Volúmico em função da posição axial z (m^3/s)
$w_s(r)$	Velocidade de Deposição/Terminal das Partículas (m/s)
$w(r)$	Velocidade radial das partículas em função da posição radial r (m/s)

Recirculação Mecânica (secção 2.3)

$\dot{V}_2$	Caudal Mássico de gás que recircula para o ciclone (kg/s)
$\dot{V}_4$	Caudal Mássico de gás que escapa para a chaminé (kg/s)
η_c	Eficiência global do ciclone isolado
η_R	Eficiência global do recirculador isolado
a_{in}	Altura da Entrada do concentrador (m)

a_{out}	Altura da saída do concentrador (m)
A'	Parâmetro Simplificação
b_{in}	Largura da Entrada do concentrador (m)
b_{out}	Largura da saída do concentrador (m)
B'	Parâmetro Simplificação
C_0	Concentração mássica que sai do processo industrial (kg/m ³)
C_0^*	Concentração mássica após nó de mistura (kg/m ³)
C_1	Concentração mássica capturada no sistema (kg/m ³)
C_2	Concentração mássica que escapa ao sistema (kg/m ³)
C_3	Concentração mássica que sai do sistema ou que recircula (kg/m ³)
C'	Parâmetro Simplificação
D_{conc}	Diâmetro do Concentrador (m)
D_{turb}^c	Coeficiente de dispersão turbulenta no concentrador (m ² /s)
D_e^c	Diâmetro de saída do concentrador para a chaminé (m)
D'	Parâmetro Simplificação
H^c	Altura do Concentrador (m)
H_s^c	Altura da zona de separação do concentrador (m)
K	Coeficiente que traduz a transferência de momento angular entre a parede e o gás
r_a^c	Raio do Concentrador (m)
r_i^c	Raio da Saída de Ar do concentrador (m)
R_r	Rácio de recirculação do sistema
ss_{in}^c	Distância da Entrada do Ar ao Topo do concentrador (m)
ss_{out}^c	Distância da Saída do Ar ao Fundo do concentrador (m)
$u^c(r)$	Velocidade tangencial do Fluido na posição r para o concentrador (m/s)

Recirculação Electrostática (secção 2.4)

δ	Densidade relativa do gás
ϵ_0	Permitividade eléctrica no vácuo (F/m)
ϵ_r	Permitividade eléctrica relativa das partículas (F/m)
$\eta_{e,modelo1}$	Eficiência global do campo eléctrico modelo parede
$\eta_{e,modelo2}$	Eficiência global do campo eléctrico modelo cilindro central
η_e	Eficiência global do campo eléctrico isolado
η_R^{loop}	Eficiência global do sistema com recirculação mecânica em estado estacionário
$\frac{dn}{dt}$	Taxa de colisões entre iões e partículas (1/s)
λ	Percurso livre molecular médio (m)
$\vec{F}_\mu$	Força viscosa sobre a partícula (N)
$\vec{F}_e$	Força eléctrica sobre a partícula (N)

$\vec{F}_g$	Força gravítica sobre a partícula (N)
$\vec{F}_i$	Força inercial sobre a partícula (N)
$\vec{w}$	Velocidade de migração das partículas carregadas (m/s)
ρ_0	Densidade de partículas carregadas por unidade de volume ($1/m^3$)
τ_Q	Tempo característico de carga das partículas (s)
A^e	Constante empírica
$A_{NE,tot}$	Área total de colecção no precipitador electrostático (m^2)
A_{sup}	Área superficial das partículas (m^2/m^3)
B^e	Constante empírica
b_{elec}	Mobilidade eléctrica ($m^2/V/s$)
C	Concentração de partículas carregadas (kg/m^3)
d	Distância das partículas têm que percorrer para serem colectadas no precipitador em meio laminar (m)
E_0	Campo eléctrico necessário para iniciar a ionização/Corona
i_{final}	Intensidade de corrente inicial no precipitador limpo (A)
$i_{inicial}$	Intensidade de corrente final no precipitador com partículas (A)
i_{tot}	Intensidade de corrente total no precipitador (A)
i_t	Intensidade de corrente por tubo do precipitador (A)
j_{NE}	Densidade de corrente em função do diâmetro do precipitador electrostático (A/m^2)
j_{SE}	Densidade de corrente em função do diâmetro do eléctrodo (A/m^2)
K	Constante dieléctrica das partículas
k_B	Constante de Boltzmann ($m^2 kg/s^2/K$)
L	Comprimento de colecção total no precipitador em meio laminar (m)
$L_{NE,tot}$	Comprimento total de colecção no precipitador electrostático (m)
N	Densidade de carga molecular de um gás (C/m^3)
N_0	Concentração total de iões no gás ($1/m^3$)
q	Carga de uma partícula (C)
$Q_{p,Cochet}^\infty$	Carga de saturação de uma partícula pelo modelo de Cochet (C)
$Q_{p,Cochet}(t)$	Carga de uma partícula em função do tempo t pelo modelo de Cochet (C)
Q_p^∞	Carga de saturação de uma partícula (C)
$Q_p(t)$	Carga de uma partícula em função do tempo t (C)
r_{NE}	Raio do precipitador electrostático (m)
r_{SE}	Raio do eléctrodo (m)
r_p	Raio da partícula (m)
Sup	Supressão de corrente (%)
v_{rms}	Velocidade média quadrática do fluido (m/s)
V_0	Voltagem/Potencial corresponde ao campo E_0 (V)
V_0'	Potencial efectivo de Corona (V)

V_{fasca} Potencial de faísca (V)

Capítulo 3

Aglomeração interparticular em meios turbulentos

Sumário do Capítulo

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos relevantes acerca de turbulência, e é feita uma descrição detalhada do modelo de aglomeração de partículas em meio turbulento escolhido para modelizar o fenómeno dentro do ciclone.

Pretende-se com este capítulo contextualizar os princípios teóricos em que se baseia o modelo de aglomeração, e apresentar o último dos modelos teóricos integrados no modelo PACyc, o qual será apresentado em detalhe no Capítulo 4.

3.1 Turbulência

Sendo este tópico muito vasto, e tendo em conta a importância deste fenómeno para o modelo de aglomeração interparticular, é feita uma breve contextualização da turbulência, para que se perceba de uma forma mais simples quando estamos na presença da mesma.

Após essa contextualização, são apresentadas algumas formas de modelizar os fenómenos turbulentos.

3.1.1 Contextualização da turbulência

Em dinâmica de fluidos, turbulência (também referenciada como escoamento turbulento) de uma forma muito simplista é um regime de escoamento caracterizado por

mudanças de propriedades de uma forma caótica e estocástica (Wikipedia, 2010).

Quase todos os escoamentos encontrados por um engenheiro num ambiente natural ou construído pelo Homem são turbulentos, e têm como consequência directa (com particular relevância no âmbito deste trabalho) a mistura rápida de compostos presentes nesses escoamentos. Este é um facto com particular relevância para o estudos da dispersão turbulenta, conforme o evidenciado por Roberts e Webster (2000).

Segundo Tennekes (1972), embora turbulência não tenha uma definição precisa e única, esta pode ser traduzida em algumas características que lhe são intrínsecas.

- Elevadas vorticidades e mistura são indicadores de turbulência;
- A difusividade aumenta com a turbulência, pelo aumento da mistura devido a movimento em espiral no fluido (presença de turbilhões);
- A turbulência ocorre **sempre** a *Reynolds* elevados;
- A turbulência é um fenómeno que ocorre em todas as dimensões espaciais;
- Considerando a turbulência clássica, a energia cinética é transferida dos grandes turbilhões, para os mais pequenos, até que a sua escala é tão pequena que se traduz por energia interna do sistema, sendo esta dissipada através do escoamento viscoso, sendo assim este processo traduzido por uma **cascata de energia**;
- Esta cascata de energia é reversível, sendo possível que a energia interna do sistema dê origem a turbilhões pequenos e que esses por sua vez dêem origem a turbilhões maiores
- Embora a cascata de energia atinja escalas muito pequenas, essas são **sempre** maiores que a escala molecular, permitindo que o escoamento seja descrito por equações contínuas;

A turbulência em fluidos viscosos é descrita pelas equações de Navier-Stokes (aperfeiçoadas por Stokes em 1845) e através da resolução destas (usando métodos numéricos, sendo um exemplo desses o *Direct Number Simulation*¹) são obtidas soluções acerca das propriedades do fluido em qualquer instante e em qualquer ponto do espaço.

Esta abordagem aplica-se apenas para situações onde o número de Reynolds é moderado e para geometrias e condições-fronteira muito simples. Para casos mais complexos (que são a clara maioria para descrever os fenómenos que ocorrem no dia-a-dia),

¹Neste tipo de aproximação, as equações de Navier-Stokes são resolvidas sem recorrer a nenhum modelo de turbulência, o que implica que a turbulência tenha que ser resolvida simultaneamente para todo o espaço e tempo em que ocorre.

optam-se por fazer simplificações destas equações, princípio amplamente aplicado nas mais diversas áreas de Engenharia.

Tendo enunciado alguns dos princípios básicos que definem turbulência, são agora abordadas as equações que traduzem (na maioria dos casos, de uma forma aproximada) o funcionamento desta.

3.1.2 Modelização da turbulência

No sentido de descrever de uma forma simples o escoamento quando estamos em escoamento turbulento, uma variável que traduz o comportamento global desse escoamento é o tamanho dos turbilhões que depende essencialmente da velocidade média do escoamento e das características geométricas do sistema.

O tamanho dos turbilhões está intimamente ligado às escalas de turbulência que se estendem desde as maiores escalas até as escalas mais pequenas (onde ocorre a dissipação de energia).

Considerando a definição de Tennekes (1972), uma das escalas de turbulência mais usada e reconhecida é a escala de Kolmogorov (η) (Kolmogorov, 1942) que está relacionada com a maior escala de turbulência (L) pela equação 3.1,

$$\frac{L}{\eta} = (R_m)^{\frac{3}{4}} \quad (3.1)$$

onde R_m é o número de *Reynolds* à macro-escala², dado pela equação 3.2, com U a corresponder à velocidade dos maiores turbilhões e μ à viscosidade cinemática do fluido.

$$Re_m = \frac{U L}{\mu} \quad (3.2)$$

Considerando que os maiores turbilhões perdem a sua energia num espaço de tempo correspondente a uma rotação do turbilhão, e considerando que o número de *Reynolds* à micro-escala³ é igual a 1, é possível deduzir que a velocidade de dissipação de energia do turbilhão (ϵ) é da ordem de grandeza de $\frac{U^3}{L}$.

Em relação aos processos de simulação numérica da turbulência, é consensual entre os investigadores desta área, que devido a restrições computacionais, as *Direct Numerical Simulations* tendo estado fora de hipótese num passado recente, são hoje em dia ainda aplicáveis a casos muito simples dado que para casos mais complexos são muito

²Por exemplo, os turbilhões à macro-escala são perceptíveis ao olho humano.

³Diz-se que a micro-escala é a escala onde os turbilhões trocam energia.

morosas. No sentido de calcular de uma forma mais célere os escoamentos turbulentos, foram desenvolvidos vários modelos que tentam traduzir de uma forma mais simplista o fenómeno da turbulência, sendo hoje em dia amplamente usados.

Uma das simplificações mais aceites pela generalidade dos autores, é a decomposição de uma qualquer variável de estado de um escoamento turbulento em duas parcelas: uma delas corresponde ao valor médio ao longo de um intervalo de tempo da propriedade a que esta se refere, enquanto a outra parcela corresponde à flutuação dessa propriedade num instante de tempo t , devido à turbulência. Este tipo de aproximação é conhecido por *Reynolds Averaging*, dando origem às equações **RANS** (**R**eynolds **A**veraged **N**avier-**S**tokes).

Esta aproximação, para o caso particular da velocidade final do fluido, é traduzida pela equação 3.3, onde $\bar{u}(x)$ é a velocidade média ao longo do intervalo tempo e $u'(x, t)$ é a flutuação para cada instante de tempo. Da mesma forma, se pode traduzir a pressão do sistema, conforme a equação 3.4, onde $\bar{p}(x)$ é a pressão média no fluido ao longo do intervalo tempo e $p'(x, t)$ é a flutuação para cada instante de tempo.

$$u(x, t) = \bar{u}(x) + u'(x, t) \quad (3.3)$$

$$p(x, t) = \bar{p}(x) + p'(x, t) \quad (3.4)$$

As equações de movimento de um fluido em escoamento turbulento foram desenvolvidas por Navier e Stokes em 1845. Para o caso de partículas de um fluido Newtoniano ($\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$) incompressível ($\frac{D\rho}{Dt} = 0$) são traduzidas pelas equações da continuidade (equação 3.5) e pela equação de quantidade de movimento (equação 3.6). Nestas equações, tendo em conta que i e j correspondem a direcções e que a direcção j é a perpendicular à direcção i , x_i e x_j correspondem a posição do fluido em cada uma das direcções, u_i e u_j são as velocidades do fluido, f_i é o termo de fonte, ρ é a massa volumica, ν é a viscosidade cinemática do fluido e p é a pressão do fluido.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3.6)$$

Substituindo a expressão apresentada pela equação 3.3 e a correspondente para a pressão do sistema (equação 3.4), é possível obter as equações 3.7 e 3.8, já com os parâmetros médios do escoamentos.

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \overline{u'_j \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} = \overline{f_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3.8)$$

Fazendo ainda uma simplificação adicional, considerando a conservação de massa traduzida na equação 3.9,

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} + \frac{\partial u'_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.9)$$

é possível reescrever a equação 3.8, obtendo a equação 3.10,

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j u_i}}{\partial x_j} = \overline{f_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_j u'_i}}{\partial x_j} \quad (3.10)$$

que após algumas manipulações algébricas, pode ser escrita sob a forma apresentada na equação 3.11,

$$\rho \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \rho \frac{\partial \overline{u_j u_i}}{\partial x_j} = \rho \overline{f_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{p} \delta_{ij} + 2 \mu \overline{S_{ij}} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (3.11)$$

onde δ_{ij} é o delta de Kronecker e $\overline{S_{ij}}$ é dado pela equação 3.12.

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (3.12)$$

Focando no termo $\rho \overline{u'_i u'_j}$, este é normalmente referenciado como o tensor de stress de Reynolds e representa todas as flutuações de velocidade devido a turbulência, em relação ao valor médio num dado intervalo de tempo.

A presença deste termo nas equações de conservação faz com que este problema seja um problema aberto, isto é, que tenha graus de liberdade, uma vez que existem mais variáveis do que equações.

Por outro lado, não existem resultados teóricos que permitam estabelecer outras equações, independentes das anteriores, que relacionem as mesmas variáveis. Assim, surge um problema de exequibilidade das equações, o que se apelida de problema de fecho da turbulência.

Ainda que se formulem equações de prognóstico para as incógnitas, outras surgirão e sempre em maior número. Uma equação do momento de ordem n contém invariavelmente termos de ordem $n+1$. Desta forma, o problema do fecho da turbulência persiste, seja qual for o conjunto de equações que se considere. É neste facto que reside a razão pela qual a turbulência permanece como um assunto aberto na Física. A única forma de obter uma solução seria ter um conjunto infinito de equações, o que indica claramente a impossibilidade de resolução deste problema e aponta a necessidade de se desenvolverem esquemas que traduzam tão aproximadamente quanto possível a realidade.

Tendo em conta o sentido prático, para resolver estas equações é inevitável recorrer a equações aproximadas no sentido de fechar o problema. Normalmente, essas aproximações são feitas de forma a que o tensor de stress de Reynolds seja descrito por propriedades médias. Combinando isso com o conceito proposto por Boussinesq de viscosidade no turbilhão (μ_t) que aumenta, conforme a flutuação aumenta (Boussinesq, 1877), o tensor de stress de Reynolds pode ser traduzido pela equação 3.13,

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \quad (3.13)$$

onde k é a energia cinética das flutuações turbulentas e é dado pela equação 3.14.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} \left(\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} + \overline{u_3^2} \right) \quad (3.14)$$

No sentido de modelizar a relação entre a viscosidade no turbilhão e a flutuação da velocidade devido à turbulência, existem diferentes níveis de aproximação, que serão brevemente descritos em seguida.

Modelos Algébricos (ou modelos com zero equações): Esta aproximação é considerada a mais simples, uma vez que não são estabelecidas nenhuma equações algébricas para estabelecer as flutuações devido à turbulência.

O tensor de stress de Reynolds é definido como função dos gradientes de velocidade e da viscosidade turbulenta, sendo também conhecida como a aproximação de Boussinesq. Um dos exemplos é o modelo de Prandtl (1932), onde se estabelece a ligação entre o comprimento de mistura (l_m) e a viscosidade no turbilhão, conforme a equação 3.15,

$$\mu_t = \rho l_m^2 \sqrt{2 S_{ij} S_{ji}} \quad (3.15)$$

sendo S_{ij} dado pela equação 3.12 e o valor de l_m é ajustado conforme o caso.

Este modelo implica que a viscosidade do turbilhão é zero, quando o gradiente de velocidade é zero, o que não é verdade na maioria dos casos, sendo esta uma aproximação que raramente é usada para modelizar a turbulência.

Modelos com uma equação: Neste tipo de modelos, a equação de transporte é normalmente resolvida em função de uma quantidade turbulenta (normalmente a energia cinética) e uma segunda quantidade turbulenta (normalmente a escala de turbulência) é determinada através de uma expressão algébrica. É ainda considerada válida a hipótese de Boussinesq, e um exemplo deste tipo de modelos é o modelo de Baldwin e Barth (1990), que estabelece a relação traduzida pela equação 3.16.

$$\mu_t = \rho C_\mu L k^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

Nesta equação, C_μ é uma constante adimensional, L é a escala de turbulência e k é a energia cinética. Uma aproximação possível para o cálculo da energia cinética foi apresentada por Spalart e Allmaras (1992), através da equação 3.17, onde estão identificados os vários termos com influência na energia cinética do escoamento.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_j k)}{\partial x_j} = & \underbrace{- \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}}_{\text{Produção}} \\ & - \underbrace{\mu \frac{\partial \bar{u}_i'}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_j'}{\partial x_j}}_{\text{Dissipação, } \rho \epsilon} \\ & + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\underbrace{\mu \frac{\partial k}{\partial x_j}}_{\text{Molecular}} - \frac{1}{2} \underbrace{\rho \bar{u}_j' \bar{u}_i' \bar{u}_i' - \bar{P}' \bar{u}_j'}_{\text{Turbulenta}} \right)}_{\text{Difusão}} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Modelos com duas equações: Estes são os modelos dos mais usados, sendo os mais conhecidos o k -epsilon, o k -ômega e variações. Nestes, duas equações de transporte são

derivadas, no sentido de descrever dois escalares, como por exemplo a energia cinética turbulenta e a sua dissipação.

O tensor de stress de Reynolds é calculado considerando que este depende dos gradientes de velocidade e da viscosidade turbulenta, e estas últimas são calculadas em função dos dois escalares descritos na equações de transporte.

Considerando o caso particular do modelo k -epsilon, a viscosidade do turbilhão é descrita pela equação 3.18,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.18)$$

onde k é a energia cinética e ϵ é a correspondente velocidade de dissipação.

A equação de transporte em função da velocidade de dissipação (ϵ) é apresentada pela equação 3.19, considerando a adição de alguns parâmetros empíricos.

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_j \epsilon)}{\partial x_j} = C_{\epsilon,1} P_k \frac{\epsilon}{k} - \rho C_{\epsilon,2} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) \quad (3.19)$$

Considerando o modelo k -epsilon standard, os valores usuais das constantes são: $C_\mu = 0.09$, $C_{\epsilon,1} = 1.44$, $C_{\epsilon,2} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$ e $\sigma_\epsilon = 1.3$. Combinando as equações 3.17 e 3.18, é possível obter μ_t , que depois é usado na equação 3.11, sob a forma de tensor de stress de Reynolds.

Como grande vantagem deste modelo em particular, temos o facto de ser robusto, económico em termos de computação e capaz de prever com alguma precisão os resultados para uma larga gama de escoamentos. Como desvantagens, temos a sua fraca capacidade de prever os escoamentos com segregação, ou com grandes turbilhões, daí surgirem modelos alternativos com duas equações.

É no entanto relevante referir que todos estes modelos são baseados na teoria de viscosidade do turbilhão proposta por Boussinesq.

Reynolds Stress Model: Com este tipo de modelo, é derivada uma equação para o tensor de Reynolds, sendo por isso adicionada uma equação para determinar a escala de turbulência.

Normalmente é usada a equação particular para a dissipação da energia cinética do turbilhão, sendo importante referir que este tipo de modelo (ao contrário dos apresentados anteriormente) não assenta na teoria de Boussinesq.

Assim sendo, este tipo de modelo propõe que para o tensor de stress de Reynolds, seja estabelecida a equação de transporte, transcrita na equação 3.20,

$$\frac{\partial \overline{\rho u'_i u'_j}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho u_k u'_i u'_j}}{\partial x_k} = D_{ij} + P_{ij} + \Pi_{ij} - \epsilon_{ij} \quad (3.20)$$

onde o termo de dispersão é dado pela equação 3.21,

$$D_{ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left(\overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + \overline{P' u'_j \delta_{ij}} + \overline{P' u'_i \delta_{ji}} - \mu \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right) \quad (3.21)$$

o termo de produção é dado pela equação 3.22,

$$P_{ij} = -\rho \left(u'_i u'_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + u'_j u'_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (3.22)$$

o termo de pressão é dado pela equação 3.23,

$$\Pi_{ij} = P' \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.23)$$

e o termo de dissipação é dado pela equação 3.24.

$$\epsilon_{ij} = -2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \quad (3.24)$$

Este modelo é largamente usado nas situações em que o modelo k -epsilon não conduz a bons resultados, sendo comum em simulações CFD, principalmente em condições de turbulência anisotrópica.

Large Eddy Simulation: Segundo Moser et al. (2005) e Peinke et al. (2005) “Uma das formas mais compreensiva e precisa de simular e prever o comportamento de escoamentos turbulentos é através da Large Eddy Simulation, uma vez que embora represente de uma forma incompleta a turbulência à macro-escala, consegue que esta seja calculada pela resolução do problema da turbulência à micro-escala”.

Como resultado, este tipo de modelo tende a ser mais preciso do que qualquer um dos modelos baseados na estratégia que conduz às equações RANS, apresentando algumas restrições relevantes na sua aplicação. Uma das principais é o enorme potencial computacional necessário quando comparado com qualquer dos modelos RANS.

Com esta abordagem, é impossível capturar a turbulência perto das paredes (Chen e Stevens, 2000), uma vez que com a diminuição da escala que este modelo implica, se perde a noção da zona estagnante e do seu impacto no escoamento.

Sendo esta uma área onde vários grupos de investigação estão a desenvolver os seus trabalhos, este tipo de modelos são apenas usados em situações particulares, como o caso de geometrias de volumes de controlo simples.

Tendo presente que a turbulência não é objecto de estudo aprofundado neste trabalho, os modelos desenvolvidos até à data não se consideraram compatíveis com o sistema que foi estudado. Levando ainda em linha de conta as restrições computacionais e o elevado grau de dificuldade de implementação deste tipo de formulação, optou-se por não usar este tipo de modelos neste trabalho.

3.2 Aglomeração

A aglomeração e deposição de pequenas partículas de sólido em meios líquidos ou gasosos (fluidos) são encontradas numa grande variedade de situações, desde a manufatura ao processamento de produtos, até mesmo na natureza.

A deposição pode ocorrer numa superfície imersa no fluido, isto é, numa superfície que seja várias ordens de grandeza maior do que as partículas que nela depositam. Para que isto aconteça, forças como a gravidade e a centrifuga têm um papel determinante.

Por sua vez, a aglomeração envolve a formação de agregados de partículas que colidem e que são mantidas juntas devido a forças de superfície entre elas. De um ponto de vista mecânico, a deposição de uma partícula numa superfície muito maior do que a partícula que nela deposita, pode ser encarada como um caso limite da aglomeração interparticular, bastando para isso considerar que uma das partículas tem dimensão infinita.

Estes fenómenos são importantes para a indústria, sendo disso exemplos a indústria química, electrónica, ambiental, entre outras. Por exemplo, o processo de deposição é usado na preparação de filmes que são usados na captura de impulsos eléctricos, na purificação de água através de filtros de leito fixo, assim como na captura selectiva de sólidos, células e outras espécies macro moleculares. A aglomeração e o seu impacto no sentido de formar partículas maiores é um fenómeno que tem particular relevância na melhoria da captura de partículas através das forças gravitacionais que se estabelecem na limpeza de águas residuais por floculação. É muito comum usar a combinação destes dois fenómenos no sentido de controlar a velocidade de deposição ou a morfologia dos aglomerados, entre outras variáveis.

A aglomeração e deposição de partículas desempenham também um papel importante no transporte de poluentes em meio aquático, assim como o transporte de vírus, bactérias e partículas aerossolizadas em meios gasosos.

No sentido de descrever estes processos, existe uma necessidade de integração multidisciplinar, sendo necessário considerar áreas tão abrangentes como a hidrodinâmica, a físico-química de superfícies e coloidal assim como são necessários métodos computacionais avançados, no sentido de modelizar e prever o comportamento das partículas como aglomerados e a sua deposição.

Focando e enfatizando a relevância da aglomeração para este trabalho, esta pode-se considerar como uma das constituintes dos processos enquadrados no aumento de tamanho de partículas. Normalmente o aumento de tamanho de partículas é usado para melhorar uma característica relevante no processo físico-químico a ocorrer. Como alguns exemplos particulares disso temos:

- Produção de formas e estruturas úteis, no caso de materiais metalúrgicos, onde temos os exemplos das esferas usadas nos rolamentos,
- Definição de quantidade fixas e definidas de materiais, possíveis de dosear e administrar (caso farmacêutico);
- Redução de perdas de material (no caso de pós) ou na sinterização (no caso da indústria do aço);
- Aumento da densidade do material, de forma a facilitar o armazenamento de materiais;
- Controlo da solubilidade do produto (no caso da indústria alimentar) ou porosidade de material (no caso de catalisadores);

Em termos históricos, considera-se que o início do uso dos processos de aumento de tamanho das partículas, ocorreu durante a primeira metade do século XIX, em áreas como a cerâmica, a medicina ou a metalurgia. Durante o período de um século (até à época pós Segunda Guerra mundial), outras áreas beneficiaram directamente com estes processos, como as áreas da exploração mineira, a química e alimentar.

Tendo estes processos tido vastas aplicações, poder-se-á dizer que o estudo dos fenómenos de aglomeração, tiveram o seu início na primeira parte do século XX, com os trabalhos visionários de Smoluchowsky (1917).

3.2.1 Evolução da teoria de colisão-aglomeração

O modelo usado neste trabalho para prever a aglomeração, leva em consideração dois fenómenos que estando intimamente ligados ao resultado de uma aglomeração, são passíveis de serem estudados de uma forma dissociada: o mecanismo de colisão e o cálculo da eficiência de colisão.

Os modelos fenomenológicos nestas áreas são bastantes complexos, sendo que o modelo apresentado é obtido através de um processo de simplificação, sendo este último apresentado em detalhe na Secção 3.2.2.

Em seguida apresentam-se de um forma muito sucinta os princípios básicos que regem os dois fenómenos anteriormente referidos.

Mecanismos de transporte subjacentes ao fenómeno de colisão-aglomeração

Os diversos modelos de previsão de aglomeração interparticular baseiam-se sempre em três mecanismos de transporte de partículas:

- Difusão Browniana, que conduz a aglomeração pelo mecanismo pericinético;
- Fenómenos viscosos justificados pelo movimentos do fluido, que conduz a aglomeração pelo mecanismo ortocinético;
- Deposição diferencial de partículas;

Difusão Browniana: Na equação 3.25 apresenta-se a frequência característica de colisão (k_{ij}) quando se considera apenas a difusão Browniana, conduzindo às aglomerações através do mecanismo pericinético.

$$k_{ij} = \frac{2 k_B T}{3 \mu} \frac{(r_{p,i} + r_{p,j})^2}{r_{p,i} r_{p,j}} \quad (3.25)$$

Nesta equação, k_B corresponde à constante de Boltzmann, T a temperatura absoluta, μ à viscosidade do fluido e $r_{p,i}$ e $r_{p,j}$ aos raios das partículas i e j .

Este mecanismo é dominante em duas situações distintas que não se excluem mutuamente:

- quando as partículas são muito pequenas ($r_{p,i} \vee r_{p,j} \ll 1\mu\text{m}$);
- quando as partículas têm o mesmo tamanho, actuando como uma acção independente das dimensões das partículas em estudo;

Após algumas manipulações algébricas que se consideram fora do âmbito desta tese, chega-se à conclusão que o número total de partículas (n_T) em função do tempo é dado pela equação 3.26,

$$n_T(t) = \frac{n_0}{1 + \frac{t}{\tau_a}} \quad (3.26)$$

onde n_0 corresponde ao número inicial de partículas e τ_a é a constante de tempo de coagulação ou período de meia-vida, e para o caso de partículas do mesmo tamanho é calculado pela equação 3.27.

$$\tau_a = \frac{3\mu}{4k_B T n_0} \quad (3.27)$$

Fenómenos viscosos justificados pelo movimentos do fluido: Na equação 3.28 apresenta-se a frequência característica de colisão quando se consideram os fenômenos viscosos que ocorrem na interação do fluido com as partículas, considerando as aglomerações através do mecanismo ortocinético, $\vec{G}$ corresponde ao gradiente de velocidades do fluido.

$$k_{ij} = \frac{4}{3} \vec{G} (r_{p,i} + r_{p,j})^3 \quad (3.28)$$

Este mecanismo é dominante quando as partículas têm um diâmetro entre $1\mu\text{m}$ e $10\mu\text{m}$ e é favorecido se estas tiverem tamanhos diferentes.

Considerando este mecanismo, o número total de partículas em função do tempo é dado pela equação 3.29, com α é fração volúmica das partículas suspensas.

$$n_T(t) = n_0 \exp\left(-\frac{4G\alpha t}{\pi}\right) \quad (3.29)$$

Deposição diferencial de partícula: Na equação 3.30 apresenta-se a frequência característica de colisão quando as partículas em estudo têm tamanhos e/ou massa volúmica substancialmente diferentes, considerando o fenômeno de deposição diferencial, onde g é a aceleração gravitacional, ρ_p é a massa volúmica das partículas e ρ é a massa volúmica do fluido.

$$k_{ij} = \frac{2\pi g}{9\mu} (\rho_p - \rho) (r_{p,i} + r_{p,j})^3 (r_{p,i} - r_{p,j}) \quad (3.30)$$

Este mecanismo é dominante quando as partículas são relativamente grandes ($d_p > 10\mu\text{m}$).

Na Figura 3.1 apresenta-se a comparação dos resultados das frequência características de cada mecanismo de colisão, para uma partícula-alvo de $1\mu\text{m}$.

Comprova-se que para partículas muito pequenas, o mecanismo dominante é o perikinético, que para partículas de tamanho próximos de $1\mu\text{m}$, o mecanismo ortocinético é o dominante e para partículas maiores, a deposição diferencial é o mecanismo dominante.

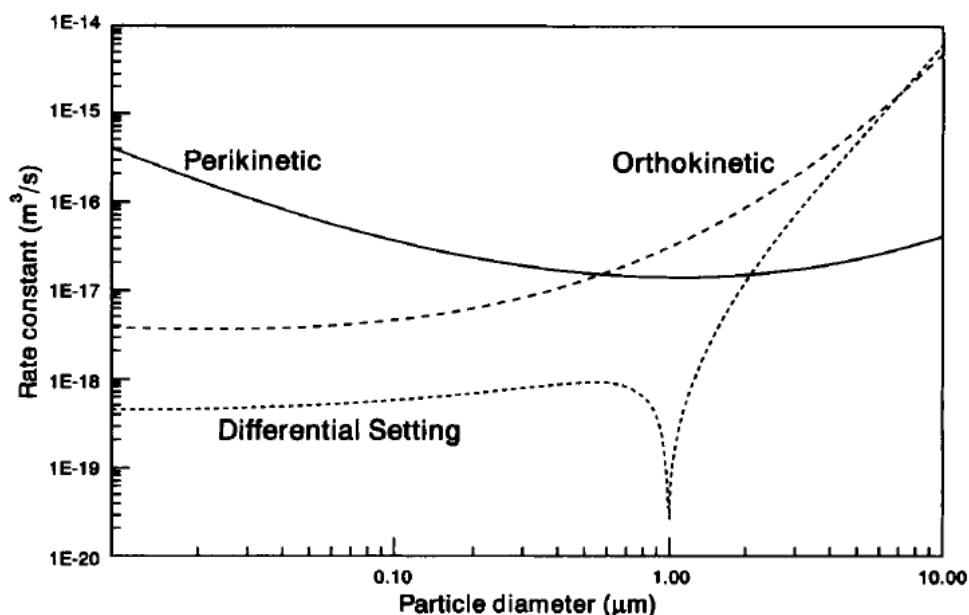


Figura 3.1 Comparativo das velocidades características de cada mecanismo de colisão de uma partícula de $1\mu\text{m}$ em função do diâmetro da segunda partícula (Elimelech et al., 1995)

Eficiência de colisão-aglomeração

O estudo da eficiência de colisão-aglomeração pode ser feito através de três parâmetros: usando a perspectiva proposta por Fuchs (1934), calculando-se o rácio de estabilidade; no caso de partículas maiores e sem carga electroquímica, estudando-se a colisão ortocinética; por último, levando em linha de conta as acções viscosas do fluido, estudando a interacção hidrodinâmica.

O rácio de estabilidade proposto por Fuchs (W) corresponde ao inverso da eficiência de colisão e é obtido considerando que apenas as forças de van der Waals e a repulsão

eléctrica actuam sob as partículas e causam os fenómenos responsáveis pela aglomeração de partículas. A fórmula de cálculo deste parâmetro é transcrita na equação 3.31,

$$W = 2 \int_0^\infty \frac{\exp\left(\frac{\phi_T}{k_B T}\right)}{(u+2)^2} du \quad (3.31)$$

onde ϕ_T é o valor da interacção global entre partículas, e u é função dos diâmetros das partículas e da distância entre elas (d), conforme o apresentado pela expressão 3.32.

$$u = \frac{2d}{r_{p,i} + r_{p,j}} \quad (3.32)$$

Assim sendo, este parâmetro permite traduzir o comportamento quando o mecanismo preferencial de colisão é o mecanismo pericinético, tendo especial relevância quando se estuda o comportamento de partículas carregadas electricamente, em particular quando estas estão presentes em soluções electrolíticas.

No caso das partículas que tenham comportamento não-Browniano, o conceito de Fuchs não traduz correctamente os fenómenos responsáveis pela manutenção de aglomerados, sendo por isso necessário levar em linha de conta os fenómenos induzidos pelo fluido, estando a estes associado o mecanismo de colisão ortocinética.

Neste caso particular, este fenómeno não faz sentido por si só, sendo necessário acoplar o estudo da interacção hidrodinâmica, uma vez que é tão mais difícil o fluido interparticular escoar, quanto mais perto as partículas estão.

Assim sendo, acopla-se um factor correctivo ($\beta(u)$) ao rácio de estabilidade de Fuchs, que traduz a diminuição de estabilidade dos aglomerados conforme as partículas estão mais próximas, conforme a expressão 3.33.

$$W = 2 \int_0^\infty \frac{\beta(u) \exp\left(\frac{\phi_T}{k_B T}\right)}{(u+2)^2} du \quad (3.33)$$

Uma correlação para calcular este valor correctivo é apresentada na equação 3.34, tendo esta sido proposta por Honig et al. (1971), considerando para tal que ambas as partículas têm o mesmo diâmetro (simplificando a expressão 3.32 para $u = \frac{d}{r_p}$).

$$\beta(u) = \frac{6u^2 + 13u + 2}{6u^2 + 4u} \quad (3.34)$$

Analizando o impacto da equação 3.34 na equação 3.33, conforme a distância relativa diminui, o factor correctivo aumenta o que implica que o rácio de estabilidade

aumente, diminuindo a eficiência de colisão. Quando a distância de colisão tende para zero, o factor correctivo tende para infinito o que se traduziria numa impossibilidade de formação de aglomerados através deste mecanismo. Tal não acontece uma vez que a distâncias muito pequenas, as forças de van der Waals contrabalançam a resistência hidrodinâmica, permitindo afirmar que este factor correctivo contempla a situação limite da pior estabilidade possível para cada aglomerado formado.

Tendo contextualizado os mecanismos por trás do fenómeno de aglomeração, apresenta-se em detalhe o modelo de aglomeração interparticular escolhido.

3.2.2 Modelo usado neste trabalho

O modelo adoptado neste trabalho foi proposto nos modelos de Sommerfeld (2001) e Ho e Sommerfeld (2002), e correspondentes evoluções em Sommerfeld e Ho (2003) e Sommerfeld (2003). Este baseia-se nos princípios de interacção coloidal anteriormente apresentados, levando ainda em linha de conta o meio turbulento onde se processa a aglomeração.

Considerando o caso de meios turbulentos, dois casos limite podem ser identificados em função do número de Stokes (St), que é definido pelo rácio entre o tempo de resposta da partícula (τ_p) e a escala de tempo integral da turbulência (T_t).

Para partículas que são menores do que o comprimento característico da escala de Kolmogorov, isto é, quando $St \rightarrow 0$, as partículas têm tendência para seguir o fluido e o seu comportamento turbulento, sendo a frequência de colisão dada pela equação 3.35, onde $n_{p,i}$ e $n_{p,j}$ correspondem à concentração numérica das partículas com diâmetro i e j , $r_{p,i}$ e $r_{p,j}$ são os raios das partículas i e j , ϵ é a velocidade de dissipação da energia turbulenta e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

$$k_{ij} = \left(\frac{8\pi}{15} \right)^{\frac{1}{2}} n_{p,i} n_{p,j} (r_{p,i} + r_{p,j})^3 \left(\frac{\epsilon}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.35)$$

No outro extremo temos o teoria cinética dos fluidos ($St \rightarrow \infty$), que diz que as trajectórias das partículas não estão correlacionadas com a trajectória do fluido, o que implica que a velocidade das partículas que colidem também não estão correlacionadas. Neste caso, a frequência de colisão é dada pela equação 3.36, onde $\sigma_{p,i}$ e $\sigma_{p,j}$ são a flutuação média da velocidade das partículas nas direcções i e j .

$$k_{ij} = 2^{\frac{3}{2}} n_{p,i} n_{p,j} (r_{p,i} + r_{p,j})^2 (\sigma_{p,i}^2 + \sigma_{p,j}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.36)$$

Na prática, em escoamentos bifásicos os limites apresentados raramente ocorrem, uma vez que a trajectória das partículas é afectada pelo fluxo turbulento do fluido. Assim sendo, a intensidade da correlação entre as trajectórias pode ser descrita como dependente do número de Stokes, e uma expressão para o cálculo da frequência de colisão de partículas é apresentada pela equação 3.37, tendo sido inicialmente proposta por Williams e Crane (1983).

$$k_{ij} = (162\pi)^{\frac{1}{2}} n_{p,i} n_{p,j} \nu L_t \frac{\rho}{\rho_p} \frac{\overline{u_{rel}}}{\sigma_F} (St_i^{0.5} + St_j^{0.5})^2 \frac{2}{\pi} \times \arctan \left(\frac{1}{3} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{\sigma_F L_t}{\nu} \left(\frac{\overline{u_{rel}}}{\sigma_F} \right)^2 \frac{St_i^{0.5} St_j^{0.5}}{(St_i^{0.5} + St_j^{0.5})^2} \right) \quad (3.37)$$

Nesta equação L_t é o comprimento da escala de turbulência, $\overline{u_{rel}}$ é a velocidade relativa média das partículas que colidem, σ_F é a flutuação da velocidade do fluido, ρ é a massa volúmica do fluido e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

A velocidade relativa média das partículas que colidem é calculada segundo Williams e Crane (1983), através da equação 3.38.

$$\frac{\overline{u_{rel}}}{\sigma_F} = \frac{(St_i + St_j)^2 - 4 St_i St_j \sqrt{\frac{(1 + St_i + St_j)}{(1 + St_i)(1 + St_j)}}}{(St_i + St_j)(1 + St_i)(1 + St_j)} \quad (3.38)$$

A estratégia adoptada para simular as colisões e aglomerações interparticulares passa pela construção de simulações usando os princípios das *Direct Number Simulations*, em que todas as partículas injectadas são acompanhadas simultaneamente (em termos de posição e de velocidade), analisando o resultado do binómio colisão-aglomeração entre quaisquer duas partículas em função da sua posição e velocidade num determinado passo de integração.

Em termos de mecanismo preferencial de colisão/aglomeração, Davies (1973) mostrou que para escoamentos viscosos, o mecanismo dominante é a difusão Browniana, sendo que tal não acontece para escoamentos turbulentos, como os que ocorrem no ciclones.

Este facto foi comprovado em leito fluidizados por Mao et al. (2002), que mostraram que para escoamentos turbulentos, este mecanismo não é dominante mesmo para partículas com diâmetros de $\approx 0.2\mu\text{m}$.

Importância das colisões interparticulares

A probabilidade de colisão de duas partículas depende principalmente da sua concentração, do tamanho das partículas e do seu movimento. Através do rácio do tempo de resposta de uma partícula (τ_p) e o tempo entre colisões (τ_c) é possível estimar a importância relativa das colisões para a modificação das trajectórias das partículas.

Existem assim dois casos limite: o fluxo de partículas em meio diluído ($\frac{\tau_p}{\tau_c} \ll 1$) sendo as trajectória das partículas governada pela transporte no fluido segundo a acção das forças de arrasto, viscosas e turbulentas; por outro lado, há o fluxo de partículas em meio denso ($\frac{\tau_p}{\tau_c} \gg 1$) em que as trajectórias das partículas são dominadas pelas colisões interparticulares.

No sentido de definir o limite de cada um dos caso acima referidos, Abrahamson (1975) propõe que o diâmetro que separa as fases diluída e densa seja definido pela equação 3.39,

$$d_p^{lim} < \frac{3}{4} \pi^{\frac{1}{2}} \frac{\mu}{\alpha \rho_p \sigma_p} \quad (3.39)$$

onde $\alpha = \frac{\pi}{6} D_p^3 N_p$ é a fracção volúmica das partículas e σ_p é a flutuação média da velocidade das partículas. É possível estabelecer uma expressão equivalente, considerando a concentração mássica (c_m) de partículas no fluido, conforme se apresenta na equação 3.40,

$$d_p^{lim} < \frac{3}{4} \pi^{\frac{1}{2}} \frac{\mu}{c_m \rho \sigma_p} \quad (3.40)$$

Considerando as equações acima apresentados, a Figura 3.2 representa a linha de separação entre as zonas para um fluido as seguintes propriedades ($\rho = 1.15 \text{ kg/m}^3$ e $\mu = 1.84 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$) e partículas com massa volúmica de 2500 kg/m^3 .

Para os casos de estudo neste trabalho, é possível observar que nos encontramos sempre num escoamento diluído, baseada na teoria cinética dos gases, sendo possível traduzir a frequência de colisão (f_c) de uma partícula com diâmetro $d_{p,i}$ e velocidade $\vec{u}_{p,i}$, com todas as outras classes a terem um diâmetro $d_{p,j}$ e velocidade $\vec{u}_{p,j}$, pela equação 3.41.

$$f_c = \sum_{j=1}^{N_{classes}} \frac{\pi}{4} (d_{p,i} + d_{p,j})^2 |\vec{u}_{p,i} - \vec{u}_{p,j}| n_{p,j} \quad (3.41)$$

As principais considerações feitas para deduzir a equação 3.41 foram:

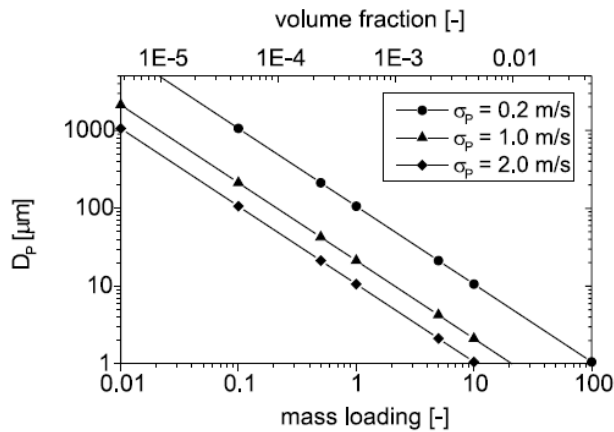


Figura 3.2 Definição do limite entre escoamento diluído ou denso em função da fracção volúmica (e concentração mássica) e diâmetro de partícula, para diferentes flutuações de velocidade das partículas (Sommerfeld, 2001)

- A concentração numérica de partículas é suficientemente pequena para as colisões binárias prevalecerem como dominantes;
- A concentração numérica de partículas é suficiente para que se considere que o fenómeno de colisão possa sofrer um tratamento estatístico/probabilístico;
- As velocidades das partículas não estão correlacionadas, sendo definidas pelas condições do fluido;

Trajectórias das partículas - perspectiva Lagrangiana

Neste trabalho, o estudo da trajectória das partículas foi feito a plano com cota constante, tornando a trajectória das partículas bidimensional permitindo não só que o sistema convirja mais rapidamente, como também que tenha menores problemas de divergência.

Para o cálculo das trajectórias individuais de cada partícula, considera-se que o movimento do fluido afecta as partículas mas que o contrário não acontece, isto é, o movimento das partículas não afecta o movimento do fluido, sendo esta metodologia conhecida como *one-way coupling*.

Esta simplificação implica uma formulação mais simples das equações de trajectórias das partículas. Além disso, Meier e Mori (1998) mostraram que, para meios diluídos como os que ocorrem neste trabalho, as diferenças nas velocidades mesmo junto da

parede (onde a concentração de partículas é maior), usando uma formulação em que o movimento das partículas também afectava o movimento do fluido (metodologia referida como *two-way coupling*), são pequenas ($\approx 0.3\text{m/s}$), justificando por isso que a simplificação feita, não tenha grande impacto nos valores finais de velocidade.

Tendo isto presente, a trajectória e velocidade de qualquer partícula N na direcção i (considerando apenas as forças de arrasto e da gravidade) são obtidas através da integração do sistema de equações diferenciais ordinárias representado pelas equações 3.42 e 3.43.

$$\frac{dx_{p,i}^N}{dt} = u_{p,i}^N \quad (3.42)$$

$$\frac{du_{p,i}^N}{Dt} = \underbrace{\frac{3\rho_F c_D}{4\rho_p d_p^N} (u_{F,i} - u_{p,i}^N) \left| \vec{u}_F - \vec{u}_p^N \right|}_{\text{Arrasto}} + \underbrace{g_i}_{\text{Gravidade}} \quad (3.43)$$

Para calcular o coeficiente de arrasto (c_D), foi usada uma correlação na forma standard, apresentada na equação 3.44,

$$\frac{c_D}{Cun} = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1.0 + 0.15 Re_p^{0.687}) & Re_p < 1000 \\ 0.44 & Re_p \geq 1000 \end{cases} \quad (3.44)$$

com Reynolds da partícula (Re_p) a ser calculado pela equação 3.45,

$$Re_p = \frac{\rho d_p |\vec{v}_{rel}|}{\mu} \quad (3.45)$$

e o factor de Cunningham (Cun) dado pela correlação 3.46.

$$Cun = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} \left[1.257 + 0.40 \exp \left(\frac{-0.55 d_p}{\lambda} \right) \right] \quad (3.46)$$

Para o cálculo do factor de correcção de Cunningham, é necessário estimar o percurso livre médio entre as moléculas de ar (λ) a ser dado pela equação 3.47, com T em Célsius, P em mBar e μ em cP.

$$\lambda = 193.75 \mu \frac{\sqrt{T + 273.2}}{\frac{P}{1013.25}} \quad (3.47)$$

A integração do sistema de equações foi feita usando um passo de integração com um valor situado entre o tempo de resposta da partícula e o tempo de colisão entre partículas tendo variado entre 0.1 ms e 5 ms, sendo que o valor usado por omissão foi 0.5 ms.

Para gerar a velocidade instantânea do fluido ao longo da trajectória da partícula, usa-se o modelo proposto por Langevin e adaptado por Sommerfeld et al. (1993). Com esta aproximação, a velocidade do fluido na nova posição ($u_{i,n+1}^f$) está correlacionada com a velocidade do fluido na posição inicial ($u_{i,n}^f$), segundo a equação 3.48,

$$u_{i,n+1}^f = R_p(\Delta t, \Delta r) u_{i,n}^f + \sigma_{F,i} \sqrt{1 - R_{p,i}^2(\Delta t, \Delta r)} \xi_i \quad (3.48)$$

onde $\sigma_{F,i}$ é a flutuação média da velocidade do fluido e ξ_i é um numero gerado aleatoriamente a partir de uma distribuição normal padrão.

Os parâmetros associados com a turbulência são levados em linha de conta na função $R_p(\Delta t, \Delta r)$, que se encontra limitada ao intervalo $[0, 1]$. Como uma breve explicação do impacto desta variável na velocidade final do fluido, se $R_p \rightarrow 1$, a velocidade do fluido está altamente correlacionada em passos de tempo consecutivos, o que implica que a turbulência é baixa e que o fluido tem um comportamento próximo do determinístico. No entanto, se $R_p \rightarrow 0$, a função que auto correlaciona a velocidade tende rapidamente para zero, implicando uma turbulência forte e consequentes bruscas alterações da velocidade entre passos consecutivos.

Esta função que correlaciona as velocidades entre passos consecutivos é composta por duas partes: uma parte Euleriana (é feito um estudo do campo de velocidades do fluido em cada posição espacial) e uma parte Lagrangeana (é feito um acompanhamento de cada partícula individualmente, traduzindo a taxa de variação de quantidades para essa partícula). A equação 3.49 traduz a função referida, sendo de considerar que o resultado da correlação é matricial.

$$R_{p,i}(\Delta t, \Delta r) = R_L(\Delta t) \times R_{E,i}(\Delta r) \quad (3.49)$$

Focando a parte da auto correlação de velocidade Lagrangeana, adoptou-se uma forma exponencial conforme a equação 3.50,

$$R_L(\Delta t) = \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_L}\right) \quad (3.50)$$

onde o tempo integral de Lagrange (T_L) é dado pela equação 3.51, e a flutuação média da velocidade do fluido (σ_F) é calculada usando a energia cinética turbulenta apresentada pela equação 3.52.

$$T_L = c_T \frac{\sigma_F^2}{\varepsilon}, c_T = 0.4 \quad (3.51)$$

$$\sigma_F = \frac{2k}{3} \quad (3.52)$$

Considerando a correlação espacial (perspectiva Euleriana), a velocidade em duas posições arbitrárias no espaço é dada pelo tensor Euleriano (equação 3.53), recorrendo para isso aos coeficientes de correlação transversal ($f(\Delta r)$) e longitudinal ($g(\Delta r)$) propostos por Von Karman e L. (1938). Nesta, δ_{ij} corresponde ao delta de Kronecker.

$$R_{E,ij}(\Delta r) = [f(\Delta r) - g(\Delta r)] \frac{r_i r_j}{r^2} + g(\Delta r) \delta_{ij} \quad (3.53)$$

Os coeficientes transversais e longitudinais referidos são calculados usando as equações 3.54 e 3.55, onde r_i e r_j são vectores posição, r é o módulo da distância entre eles e Δr é o deslocamento.

$$f(\Delta r) = \exp\left(-\frac{\Delta r}{L_{E,i}}\right) \quad (3.54)$$

$$g(\Delta r) = \left(1 - \frac{\Delta r}{2L_{E,i}}\right) \exp\left(-\frac{\Delta r}{L_{E,i}}\right) \quad (3.55)$$

As escalas de tempo integral de Euler adoptadas foram determinadas usando as expressões 3.56, uma vez que se considera que o fluido se desloca em x e que y é a componente transversal ao escoamento.

$$L_{E,x} = 1.1 T_L \sigma_F, L_{E,y} = 0.5 L_{E,x} \quad (3.56)$$

Modelo de aglomeração interparticular

Tendo o comportamento turbulento individual das partículas calculado, é feito o estudo das interações interparticulares dentro do volume de controlo. Para isso, o

modelo estuda simultaneamente o comportamento relativo de duas quaisquer partículas, onde uma é considerada a partícula-alvo e outra a partícula-injectada.

Por definição, a partícula-alvo é a partícula maior e encontra-se parada num referencial inercial, enquanto a partícula-injectada considera-se como se se deslocasse com velocidade igual à velocidade relativa entre as duas partículas.

Para estudar o comportamento das partículas, é necessário calcular o seu tempo de resposta, usando para isso a expressão 3.57, que tem em linha de conta o arrasto de cada partícula.

$$\tau_P = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu c_D} \quad (3.57)$$

Como já referido anteriormente, o comportamento da partícula no meio turbulento pode ser traduzido (de uma forma sucinta) pelo número de Stokes, calculado pela equação 3.58, que traduz o rácio entre o tempo de resposta da partícula e o tempo integral de Lagrange.

$$St = \frac{\tau_p}{T_L} \quad (3.58)$$

A velocidade da partícula-injectada após a acção da turbulência é calculada usando uma expressão análoga à expressão para calcular a velocidade do fluido ao longo da trajectória da partícula (equação 3.48) e é dada pela correlação 3.59.

$$u'_{fict,i} = R(St) u'_{real,i} + \sigma_{P,i} \sqrt{1 - R(St)^2} \xi \quad (3.59)$$

A correlação da velocidade da partícula entre posições é tão menor, quanto maior for o número de Stokes, uma vez que o impacto da turbulência na velocidade da partícula é calculado pela equação 3.60.

$$R(St) = \exp(-0.55 St^{0.4}) \quad (3.60)$$

Fazendo uma breve análise do impacto de $R(St)$ na velocidade das partículas, à semelhança da função R_p na equação 3.48, quando $St \rightarrow 0 \Rightarrow R(St) \rightarrow 1$ o que implica que a velocidade da partícula está fortemente correlacionada com a do fluido. Quando $St \rightarrow \infty \Rightarrow R(St) \rightarrow 0$ o que implica que a velocidade da partícula é muito pouco dependente da do fluido.

Usando os valores da velocidade de cada partícula, é definida uma das variáveis que permite a tomada de decisão de ocorrência de colisão de acordo com a teoria cinética. Esta variável, a probabilidade de colisão (P_{coll}) das partículas, é definida como o produto da frequência de colisão e do intervalo de integração. A expressão para o seu cálculo é apresentada na equação 3.61, onde

$$P_{coll} = \frac{\pi}{4} (d_{p1} + d_{p2})^2 |\vec{u}_{p1} - \vec{u}_{p2}| N_p \Delta t \quad (3.61)$$

d_{p1} e d_{p2} correspondem aos diâmetros das partículas, $|\vec{u}_{p1} - \vec{u}_{p2}|$ corresponde ao valor da norma da velocidade relativa entre as duas partículas, N_p corresponde ao número total de partículas presente no volume de controlo e Δt é o passo de integração.

Para garantir que os valores de probabilidade se encontram dentro do domínio razoável, isto é, menores ou iguais a 1, e quando tal não acontece, o valor da probabilidade da partícula i colidir com cada uma das outras partículas do volume de controlo é normalizado.

No sentido de estudar espacialmente a ocorrência ou não de colisões, é definido um cilindro de colisão onde na parede lateral é colocado o centro da partícula-alvo e cujo eixo é definido pela direcção da velocidade relativa das duas partículas. Uma representação bidimensional da posição relativa das partículas é apresentada na Figura 3.3.

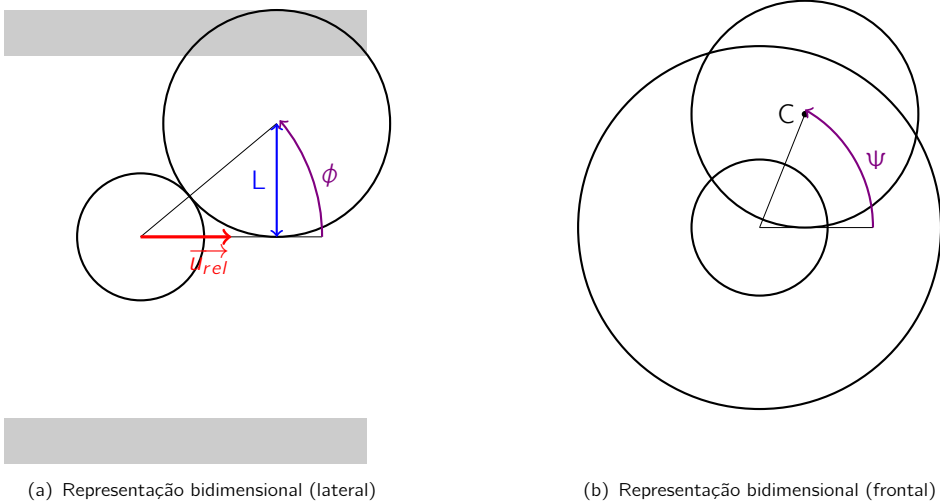


Figura 3.3 Posição relativa das partículas dentro do cilindro de colisão

Neste modelo é ainda considerada a eficiência de colisão (η_p), que é definida como

o rácio entre o número de colisões que ocorrem levando em linha de conta que as linhas de corrente divergem devido à acção da partícula-alvo e o número de colisões que ocorreriam caso as linhas de corrente não divergissem ao passar pela partícula-alvo. A expressão usada para este cálculo é apresentada pela equação 3.63.

Para estudar a colisão interparticular, é relevante fazer o estudo do comportamento dinâmico das partículas e a sua interacção com o fluido, sendo que esta é fortemente dependente do número de Reynolds da partícula. Levando isso em linha de conta, neste modelo apenas se consideram as colisões das partículas pequenas com as maiores, uma vez que o seu número de Reynolds é menor do que o das partículas-alvo, o que implica que o impacto das forças viscosas sobre essas é menor, estando por isso menos sujeitas a perturbação pela presença de partículas maiores. Se isto acontecer, é possível considerar-se que o comportamento das partículas pequenas é essencialmente inercial (ou em regime de Stokes), sendo adoptado o parâmetro inercial proposto por Schuch e Löffler (1978) conforme a equação 3.62 para posteriormente ser usado para calcular a eficiência de colisão.

$$\psi_i = \frac{\rho_p |\vec{u}_{p1} - \vec{u}_{p2}| d_p^2}{18 \mu D_k} \quad (3.62)$$

onde d_p é o diâmetro da partícula injectada e D_k é o diâmetro da partícula alvo. Considerando o valor do parâmetro inercial é possível estimar a eficiência de colisão de uma partícula isolada considerando o mecanismo de intersecção e impacto inercial, através da equação 3.63, onde a e b são parâmetros dependentes do número de Reynolds da partícula. Para o caso em que este é menor do que um, $a = 0.65$ e $b = 3.7$.

$$\eta_P = \left(\frac{\psi_i}{\psi_i + a} \right)^b \quad (3.63)$$

No entanto considera-se que existe um outro mecanismo de colisão relevante, que é a colisão entre partículas proporcionada pela dispersão turbulenta destas. Nesse casos, a expressão para o cálculo da eficiência de colisão é dada pela equação 3.64, onde Sc é o número de Schmidt da partícula calculado pela equação 3.65.

$$\eta_{p,d} = \frac{4.18}{(Sc)^{\frac{2}{3}} (Re_p)^{\frac{1}{2}}} \quad (3.64)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{turb}} \quad (3.65)$$

Considerando a eficiência de colisão como o valor máximo dos dois mecanismos, e levando em linha de conta a Figura 3.4, pode deduzir-se qual a distância mínima para haver colisão entre a partícula injectada e a partícula alvo (Y_C), sendo esta dada pela expressão 3.66.

$$\eta_P = \left(\frac{2Y_C}{D_k} \right)^2 \quad (3.66)$$

Para determinar o ponto de contacto entre as duas partículas (tendo em conta que uma delas se encontra parada num determinado referencial inercial), são gerados dois números aleatórios, conforme proposto por Sommerfeld (2001). Com a geração de dois números aleatórios e combinando-os (conforme a equação 3.67), são calculados os valores de L_a (deslocamento lateral adimensional) e de ϕ (ângulo de colisão) usando as relações matemáticas apresentadas nas equações 3.68 e 3.69

$$L_a = \sqrt{XX^2 + YY^2} \quad (3.67)$$

$$L_a = \frac{2L}{D_{p1} + D_{p2}}, L_a < 1 \quad (3.68)$$

$$\phi = \arcsin(L_a) \quad (3.69)$$

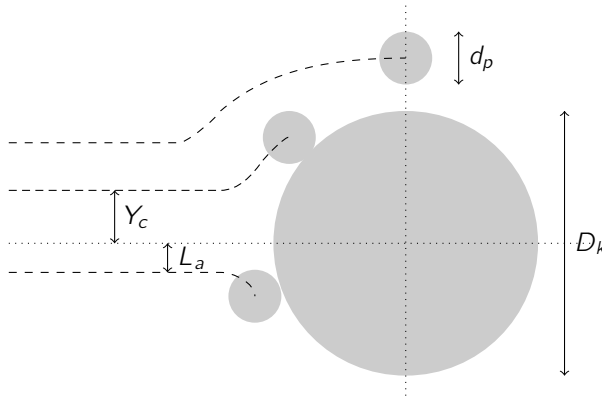


Figura 3.4 Diagrama de colisão em função das linhas de corrente

Para definir a orientação espacial do cilindro de colisão (o ângulo Ψ), este é calculado a partir de um número aleatório gerado a partir de uma distribuição uniforme, limitado ao intervalo $[0, 2\pi]$.

No sentido de definir se ocorre ou não colisão, é gerado um outro número aleatório uniforme em $]0, 1[$ (RN) e este é comparado com a probabilidade de colisão. Quando este é menor que a probabilidade de colisão e a distância da partícula injectada é menor que a distância mínima para haver colisão, considera-se que ocorreu colisão. Na expressão 3.70 são apresentadas matematicamente as condições para haver colisão.

$$(RN < P_{coll}) \wedge (L < Y_c) \quad (3.70)$$

Existem dois resultados possíveis de uma colisão: uma colisão sem aglomeração, ou uma colisão que resulta em aglomeração das partículas. Para determinar qual dos casos ocorre, o modelo calcula a velocidade crítica de colisão (v_{cr}). Este valor é obtido após se ter estabelecido um balanço de energia pré e pós-colisão e considerando que apenas as forças de van der Waals intervêm no processo de aglomeração, tal como é apresentada na equação 3.71,

$$v_{cr} = \frac{1}{d_p} \frac{\sqrt{1-e^2}}{e^2} \frac{A}{\pi z_0^2 \sqrt{6} p_{pl} \rho_p} \quad (3.71)$$

onde e é o coeficiente de restituição energético, A é a constante de Hamaker⁴, z_0 é a distância de contacto entre as partículas e p_{pl} é a pressão limite do material que constitui as partículas.

Considera-se que há a formação de um aglomerado quando a velocidade relativa das partículas projectada no eixo do cilindro é menor do que a velocidade crítica, apresentando-se na expressão 3.72, as condições necessárias para ocorrer aglomeração.

$$|\vec{u}_{p1} - \vec{u}_{p2}| \cos(\phi) \leq v_{cr} \quad (3.72)$$

No caso em que se forma um aglomerado, este apresenta características diferentes das partículas iniciais que o constituem. Assim sendo, considerando que há conservação de massa, o diâmetro do aglomerado resultante ($d_{p1,i+1}$) é calculado através da equação 3.73, considerando que este mantém uma geometria esférica.

⁴No Apêndice C é feita uma contextualização mais detalhada da obtenção do valor da constante de Hamaker

$$d_{p1,i+1} = \sqrt[3]{d_{p1,i}^3 + d_{p2}^3} \quad (3.73)$$

A massa do novo aglomerado é obtida somando as massas das partículas iniciais, conforme a equação 3.74.

$$m_{p1,i+1} = m_{p1,i} + m_{p2} \quad (3.74)$$

Considerando ainda que há conservação da quantidade de movimento, a velocidade da partícula aglomerada (no referencial inercial onde a partícula maior se encontra parada) é dada pela expressão 3.75.

$$u_{p1}'' = u_{p1,1} \left(\frac{m_{p1}}{m_{p1} + m_{p2}} \right) \quad (3.75)$$

No caso do resultado da colisão não ser um aglomerado de partículas, a nova velocidade das partículas que colidiram sem aglomeração é calculada considerando que o choque é obliquo em relação à linha imaginária que liga os dois centros das partículas. Através da resolução das equações de momento, levando ainda em linha de conta a lei de fricção segundo Coulomb, chega-se à conclusão que a componente tangencial da velocidade da partícula injectada é dada pela equação 3.76.

$$u_{p1}' = u_{p1} \left(1 - \frac{1 + e}{1 + \frac{m_{p1}}{m_{p2}}} \right) \quad (3.76)$$

Analisando a colisão sob o ponto de vista de existir ou não escorregamento no choque entre as partículas, é proposto que a condição que define a colisão sem escorregamento é dada pela equação 3.77, em que μ_f é o factor de fricção entre as partículas.

$$\frac{u_{p1}}{v_{p1}} < \frac{7}{2} \mu_f (1 + e) \quad (3.77)$$

No caso de se tratar de uma colisão sem escorregamento, a componente normal da velocidade da partícula injectada é dada pela equação 3.78.

$$v'_{p1} = v_{p1} \left(1 - \frac{\frac{2}{7}}{1 + \frac{m_{p1}}{m_{p2}}} \right) \quad (3.78)$$

Caso contrário, a componente normal da velocidade da partícula injectada é dada pela equação 3.79.

$$v'_{p1} = v_{p1} \left(1 - \mu_f (1 + e) \frac{\frac{u_{p1}}{v_{p1}} \frac{2}{7}}{1 + \frac{m_{p1}}{m_{p2}}} \right) \quad (3.79)$$

Em todos os estes casos, a velocidade da partícula-alvo permanece inalterada no referencial inercial definido.

Este processo repete-se até um determinado tempo final de interacção e como resultado final temos uma distribuição numérica composta por diversas partículas originais aglomeradas.

O processamento desta distribuição numérica final é de particular interesse para o funcionamento do modelo PACyc, que tem como propósito analisar o fenómeno de aglomeração dentro do ciclone. Este processo será descrito em detalhe no Capítulo 4.

3.3 Síntese

Neste capítulo fez-se uma breve contextualização dos fenómenos de turbulência, assim como se apresentaram algumas das hipóteses simplificativas para a sua modelização.

Com isto pretende-se introduzir alguns conceitos subjacentes ao modelo de aglomeração em meio turbulento usado neste trabalho.

É apresentado em detalhe o modelo de Sommerfeld (2001) e Ho e Sommerfeld (2002) (e evoluções em Sommerfeld e Ho (2003) e Sommerfeld (2003)) que tem como objectivo estudar o fenómeno de aglomeração (no ciclone e na zona de convergência entre a saída do recirculador e a entrada do ciclone) interparticular em meios turbulentos.

Nomenclatura

Caracteres romanos

a	Parâmetro dependente do número de Reynolds da partícula
A	Constante de Hamaker (J)
b	Parâmetro dependente do número de Reynolds da partícula
$C_{\epsilon,1}$	Constante adimensional modelo k- ϵ
$C_{\epsilon,2}$	Constante adimensional modelo k- ϵ
C_μ	Constante adimensional proposta por Baldwin e Barth (1990)
c_D	Coefficiente de Arrasto
c_m	Concentração mássica das partículas (kg/m ³)
c_T	Constante para cálculo do tempo integral de Lagrange
Cun	Factor de Cunningham
d	Distância entre as partículas (m)
D_{ij}	Termo de difusão do Reynolds Stress Model
$d_{p1,i+1}$	Diâmetro de um aglomerado a partir do diâmetro das partículas que o formam (m)
D_k	Diâmetro da partícula alvo (m)
d_p	Diâmetro da partícula (m)
d_p^{lim}	Diâmetro limite entre caso diluído e denso (m)
D_p^N	Diâmetro da partícula N (m)
e	Coefficiente de restituição energética
f_c	Frequência de colisão (1/s)
f_i	Termo de fonte na direcção i (m/s ²)
$\vec{G}$	Gradiente de velocidades do fluido (m/s ²)
g_i	Aceleração na direcção i (m/s ²)
k	Energia Cinética das flutuações turbulentas (m ² /s ²)
k_{ij}	Frequência característica de colisão (1/s)
k_B	Constante de Boltzmann (m ² kg/s ² /K)
L	Maior escala de turbulência (m)
L	Distância normal entre as partículas (m)
$L_{E,i}$	Escala de tempo integral de Euler na direcção i (s)
L_a	Deslocamento lateral adimensional
l_m	Comprimento de mistura proposto por Prandtl (1932) (m)
L_t	Comprimento da escala de turbulência (m)
$m_{p1,i+1}$	Massa de um aglomerado a partir da massa das partículas que o formam (kg)
$N_{classes}$	Número de total de diâmetros injectados inicialmente
$n_{p,i}$	Número total de partículas de raio i
$n_{p,j}$	Número total de partículas de raio j
n_0	Número inicial de partículas

n_T	Número total de partículas
P	Pressão (Pa)
$p'(x, t)$	Flutuação da pressão na posição x no instante t (Pa)
P_{coll}	Probabilidade de colisão
P_{ij}	Termo de produção do Reynolds Stress Model
p_{pl}	Pressão limite de contacto entre as partículas (Pa)
$p(x, t)$	Pressão final do fluido na posição x no instante t (Pa)
r	Módulo da distância entre os vectores i e j (m)
$R_{E,i}(\Delta r)$	Correlação das velocidade do fluido na direcção i – parte Euleriana
$r_{p,i}$	Raio da partícula i (m)
$r_{p,j}$	Raio da partícula j (m)
r_i	Vector posição i (m)
r_j	Vector posição j (m)
$R_L(\Delta t)$	Correlação das velocidade do fluido – parte Lagrangiana
$R_p(\Delta t, \Delta r)$	Função que correlaciona as velocidade do fluido entre passos
$R(St)$	Correlação da velocidade da partícula em função da velocidade do fluido
Re_m	Número de Reynolds à escala macro
Re_p	Número de Reynolds da partícula
RN	Número aleatório gerado a partir de uma distribuição uniforme
St_i	Número de Stokes das partículas i
t	Instante de tempo (s)
T	Temperatura (K)
T_L	Tempo integral de Lagrange (s)
T_t	Tempo integral da Turbulência (s)
U	Velocidade dos maiores Turbilhões (m/s)
u	Função que relaciona o tamanho das partículas e a sua distância
$u'(x, t)$	Flutuação da velocidade na posição x no instante t (m/s)
$u_{F,i}$	Norma da velocidade do fluido na direcção i (m/s)
$u'_{fict,i}$	Velocidade da partícula injectada (m/s)
$u_{i,n}^F$	Norma da velocidade do fluido na direcção i no passo n (m/s)
$u_{i,n+1}^F$	Norma da velocidade do fluido na direcção i no passo $n+1$ (m/s)
$u_{p,i}^N$	Norma da velocidade da partícula N na direcção i (m/s)
u_{p1}	Velocidade tangencial da partícula injectada (m/s)
u_{p1}''	Velocidade do aglomerado (m/s)
u_{p1}'	Velocidade tangencial da partícula injectada após colisão sem aglomeração (m/s)
$u'_{real,i}$	Velocidade do fluido na posição da partícula injectada i (m/s)
u_i	Velocidade do fluido na direcção i (m/s)
u_j	Velocidade do fluido na direcção nas outras direcções que não i (m/s)

$u(x, t)$	Velocidade final do fluído na posição x no instante t (m/s)
v_{cr}	Velocidade crítica de colisão (m/s)
v_{p1}	Velocidade normal da partícula injectada (m/s)
v'_{p1}	Velocidade normal da partícula injectada após colisão sem aglomeração (m/s)
W	Rácio de estabilidade proposto por Fuchs (1934)
x	Posição espacial (m)
$x_{p,i}^N$	Posição da partícula N na direcção i (m)
x_i	Posição do fluído na direcção i (m)
x_j	Posição do fluído na direcção nas outras direcções que não i (m)
XX	Número aleatório gerado a partir de uma distribuição uniforme
Y_c	Distância mínima entre as partículas para ocorrer colisão (m)
YY	Número aleatório gerado a partir de uma distribuição uniforme
z_0	Distância a que se considera que as partículas estão aglomeradas (m)
$\overline{u_{rel}}$	Velocidade relativa média entre as partículas que colidem (m/s)
$\overline{u(x)}$	Velocidade média na posição x (m/s)

Caracteres gregos

α	Fracção volumica das partículas suspensas
$\beta(u)$	Factor correctivo do rácio de estabilidade
Δr	Deslocamento (m)
Δt	Intervalo de tempo (s)
δ_{ij}	Delta de Kronecker
ϵ	Velocidade de dissipação da energia do turbilhão (m^2/s^3)
ϵ_{ij}	Termo de dissipação do Reynolds Stress Model
η	Escala de Kolmogorov
η_p	Eficiência de colisão
λ	Percurso médio livre entre as moléculas de gás (m)
μ	Viscosidade do Fluído (Pa s)
μ_f	Factor de fricção entre as partículas
μ_t	Viscosidade do Fluido no turbilhão (Pa s)
ν	Viscosidade cinemática do fluido (m^2/s)
ϕ	Ângulo de colisão no mesmo plano (rad)
ϕ_T	Valor total da energia de interacção das partículas (J)
Π_{ij}	Termo de tensão de pressão do Reynolds Stress Model
ψ	Ângulo que define a orientação espacial do cilindro de colisão (rad)
ψ_i	Parâmetro inercial das partículas proposto por Schuch e Löffler (1978)
ρ	Massa volumica do fluído (kg/m^3)
ρ_p	Massa volumica das partículas (kg_p/m^3_p)
$\sigma_{F,i}$	Velocidade do fluído quadrática média (m/s)

$\sigma_{p,i}$	Flutuação média da velocidade das partículas i (m/s)
$\sigma_{p,j}$	Flutuação média da velocidade das partículas j (m/s)
σ_ϵ	Constante adimensional modelo k- ϵ
σ_F	Flutuação da velocidade do fluido (m/s)
σ_k	Constante adimensional modelo k- ϵ
σ_p	Flutuação média da velocidade das partículas (m/s)
τ_{ij}	Tensão de corte entre as direcções i e j (Pa)
τ_a	Tempo de coagulação ou Período de meia-vida da aglomeração (s)
τ_c	Tempo característico de entre colisões (s)
τ_p	Tempo característico de resposta da partícula (s)
ξ_i	Número aleatório gerado a partir de uma distribuição normal

Caracteres vectoriais

$\vec{u}_F$	Velocidade da fluído (m/s)
$\vec{u}_p^N$	Velocidade da partícula N (m/s)
$\vec{v}_{rel}$	Velocidade relativa entre uma partícula e o fluído (m/s)

Capítulo 4

PACyc - Particle Agglomeration in Cyclones

Sumário do Capítulo

Neste capítulo apresenta-se em detalhe o modelo PACyc (**P**article **A**gglomeration in **C**yclones), contextualizando a motivação para o desenvolvimento do modelo, passando brevemente pelos modelos de previsão da eficiência de captura do ciclone de fluxo invertido, do ciclone recirculador de passo simples e ainda da precipitação electrostática dentro deste último.

Explica-se em detalhe o processo de acoplamento dos diversos componentes do modelo, apresentando-se as estruturas base como são a reconstrução do histórico das partículas e o cálculo das eficiências fraccionais após aglomeração.

Apresentam-se os resultados de uma análise de sensibilidade a alguns parâmetros do modelo de aglomeração assim como do modelo PACyc, concluindo com a apresentação de dois casos de estudo.

4.1 Contextualização do modelo PACyc

Os ciclones desenvolvidos por Salcedo (2000) (dando posteriormente origem à geometria *Hurricane*[®]) foram obtidos após um processo de optimização numérica, sendo que com estes é possível obter eficiências de captura muito superiores às expectáveis tendo em conta outras geometrias comerciais. Este facto foi verificado experimentalmente após a comparação com trabalhos desenvolvidos por vários autores (Hoffmann e Berrino, 1999; Hoffmann e Stein, 2002; Hoffmann et al., 1992; Hugi e Reh, 2000;

Salcedo e Coelho, 1999; Salcedo e Pinho, 2003; Salcedo et al., 2007; Wanker, 1998), sendo suportada neste trabalho a teoria que este aumento da eficiência global se deve em grande parte ao aumento substancial da eficiência de captura das partículas muito finas, uma vez que em relação às partículas maiores, os ciclones com outras geometrias também são eficientes.

Assim sendo, com os ciclones *Hurricane*[®], consegue-se aumentar a diversidade de pós com potencial de serem colectados através desta tecnologia, uma vez que se obtém elevadas eficiências, mesmo com pós muito finos.

Tendo em conta esta realidade, surge o modelo **PACyc** uma vez que nenhum dos modelos considerados neste trabalho, consegue ter uma previsão da eficiência de captura das partículas (principalmente das mais finas) próxima dos valores obtidos experimentalmente nestes ciclones *Hurricane*[®]. Assim sendo, este modelo procura prever as curvas de eficiência fraccional levando em linha de conta o fenómeno de aglomeração inter-particular, e procura validar a hipótese que é este fenómeno que justifica as elevadas eficiências para as partículas pequenas.

Neste trabalho propõe-se que após aglomeração (principalmente das partículas mais finas com as partículas maiores), as partículas mais finas se comportam dinamicamente como partículas maiores, e como a estas partículas maiores correspondem eficiências de captura maiores, as partículas pequenas (já sob a forma de aglomerados) são capturadas com eficiências de captura anormalmente elevadas.

O modelo desenvolvido parte de premissa que a geometria *Hurricane*[®] favorece a aglomeração das partículas finas dentro do ciclone de uma forma muito mais evidente do que outras geometrias.

Considerando os vários modelos integrados neste modelo, na Figura 4.1 apresenta-se a constituição final do modelo de uma forma esquemática.

Na Figura 4.1 o cálculo da eficiência do ciclone isolado está identificada por ciclone, da recirculação mecânica por R.M. e da recirculação electrostática por R.E.. Para levar em linha de conta a aglomeração, na Figura está identificada por A a aglomeração dentro do ciclone e por A_{in} a aglomeração à entrada do sistema com recirculação.

Na Figura são ainda identificadas seis zonas de opção de simulação, representadas pelos losangos. Com esta configuração final, este modelo é capaz de:

- Projectar um ciclone para que com este se obtenha uma queda de pressão máxima definida pelo utilizador ¹;

¹Ainda que esta seja uma capacidade do modelo PACyc, considera-se que uma apresentação em maior detalhe desta funcionalidade não é uma temática que se enquadre no âmbito desta tese, daí estar enquadrado numa caixa a traço interrompido na Figura 4.1.

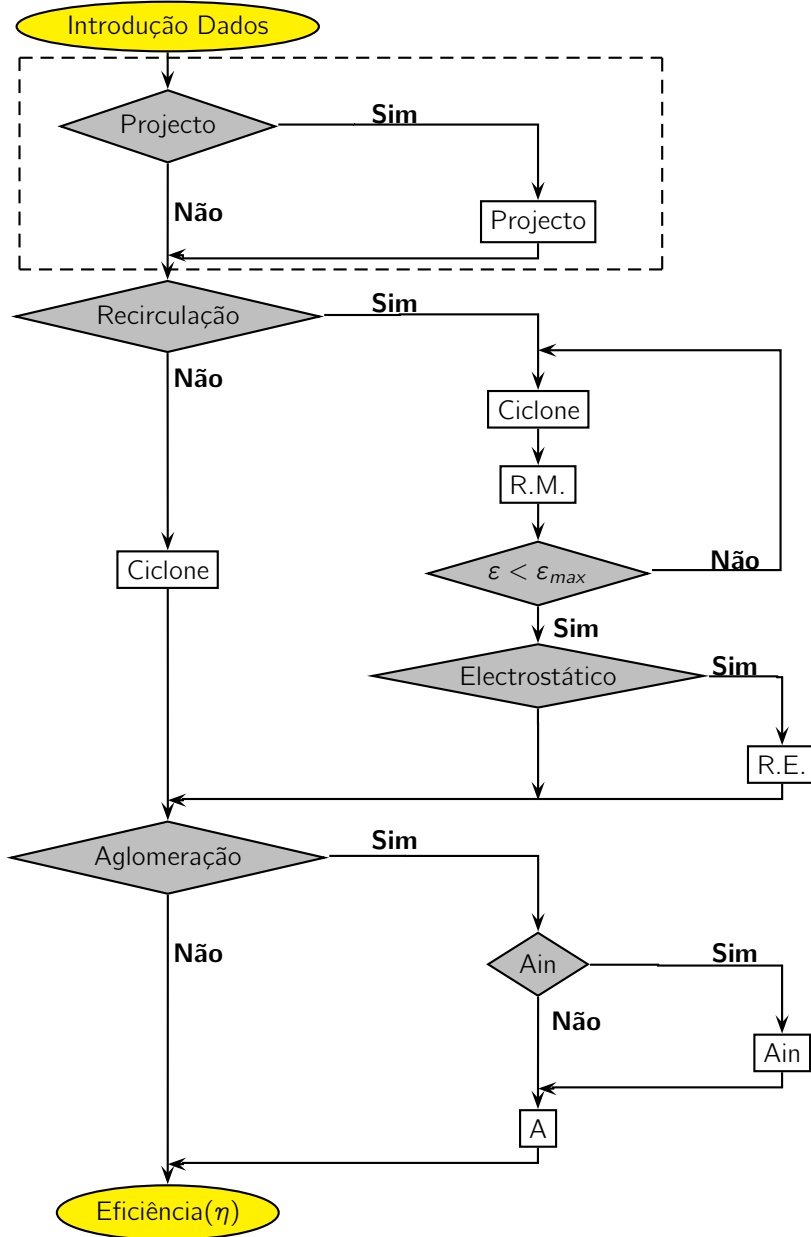


Figura 4.1 Apresentação da ligação dos constituintes principais do modelo PACyc

- Calcular a eficiência fraccional e global nos casos:
 - Ciclone isolado (sem e com aglomeração);
 - Ciclone com recirculação mecânica:
 - * Sem aglomeração;
 - * Com aglomeração (só dentro do ciclone ou à entrada e dentro do ciclone);
 - Ciclone com recirculação electrostática:
 - * Sem aglomeração;
 - * Com aglomeração (só dentro do ciclone ou à entrada e dentro do ciclone);

Em termos dos principais constituintes teóricos do modelo PACyc, considera-se que o modelo de Mothes e Löffler (1988) descreve de uma forma correcta o comportamento do ciclone quando este opera isolado sem aglomeração, sendo que a dispersão turbulenta é calculada por um dos modelos introduzidos na Secção 2.2.3, sendo que esta é função das características do ciclone, do caudal processado, etc.

No caso da recirculação sem a presença de campo eléctrico, o modelo de previsão da captura do recirculador é o modelo proposto por Salcedo et al. (2007) e a correspondente dispersão turbulenta é calculada através de um método semelhante à do ciclone.

No caso em que o campo eléctrico está presente no recirculador, este é previsto através de uma combinação de vários modelos propostos por vários autores, sendo alguns dos componentes principais baseados nos modelos de White (1963), Oglesby (1978) e Parker (1997).

No sentido de prever o fenómeno de aglomeração nas zonas de aglomeração consideradas, é feito um acoplamento do modelo proposto por Sommerfeld (2001), Ho e Sommerfeld (2002) e mais tarde completado por Sommerfeld e Ho (2003) e Sommerfeld (2003).

O resultado final do modelo são as curvas de eficiência fraccional após aglomeração, assim como uma estimativa da eficiência global do sistema.

4.2 Modelos base de previsão de eficiência de captura de partículas

4.2.1 Ciclones de fluxo-invertido

Para prever a eficiência de captura dos ciclones de fluxo-invertido, existem até à data vários modelos. Nesta trabalho optou-se por considerar como modelo mais adequado o modelo de Mothes e Löffler (1988), já descrito na Secção 2.2.4.

Para o cálculo da dispersão turbulenta, são consideradas válidas as correlações apresentadas na Secção 2.2.3, sendo o utilizador a definir qual das correlações apresentadas pretende utilizar.

No sentido de calcular a eficiência de captura do ciclone isolado, considera-se válida a expressão 2.46, que leva em consideração a concentração à entrada do ciclone e a concentração na zona de saída para a cota igual à da penetração do tubo de saída do ciclone. Tendo em conta que a concentração à entrada é um dado, para obter esta concentração à saída do ciclone, o modelo de Mothes e Löffler (1988) integra os balanços de materiais a cada uma das 4 zonas em que divide o ciclone, sendo que a dispersão turbulenta tem impacto no balanço de material das zonas 2 e 4, já descritas em detalhe na Secção 2.2.4.

Com o quociente entre a concentração à saída e a concentração à entrada, é calculada a eficiência do ciclone.

4.2.2 Ciclones de fluxo-invertido combinados com ciclones de recirculação

Este modelo baseia-se no modelo de Salcedo et al. (2007) e incide no efeito da recirculação de partículas e o seu impacto para a respectiva captura de partículas em ciclones, e já foi previamente apresentado na Secção 2.3.2.

Descrevendo muito sucintamente os primeiros passos deste modelo, inicialmente este calcula as velocidades tangenciais e axiais do fluido dentro do ciclone e do ciclone concentrador, estimando em seguida o diâmetro de corte (x_{50}) correspondente. Com este valor, constrói-se a curva de eficiência teórica do sistema ciclone de fluxo-invertido.

Como o sistema inclui recirculação mecânica, parte das partículas que passam pelo ciclone recirculador de passo simples são reinjectadas na corrente de entrada do ciclone. A forma de simular este processo é um processo dinâmico onde a perturbação induzida à entrada do ciclone (devido ao fenómeno de reinjecção) é permanentemente actualizada, até que o sistema convirja sobre a variação da entrada do ciclone. Isto é, calculam-se

valores de x_{50} e as correspondentes curvas de eficiência teórica, realimentando estas informações ao processo de simulação até que os valores variem menos do que um valor de erro especificado.

Quando o sistema converge, usando o valor de x_{50} mais recente, reconstrói-se a curva de eficiência teórica efectiva para o sistema com recirculação mecânica.

Levando em linha de conta os princípios apresentados, para o cálculo da eficiência de captura do sistema integrado, considera-se válida a equação 2.50 em que as eficiências do ciclone e do recirculador são iguais às eficiências destes quando se encontram a operar em ciclo fechado.

Para determinar as eficiências em ciclo fechado, as equações para o ciclone a operar isoladamente são válidas, tendo no entanto presente que em cada iteração, a distribuição processada pelo ciclone é diferente, originando por isso uma sequência de curvas de eficiência fraccional ligeiramente diferentes.

Para calcular a eficiência de captura do recirculador, usa-se a equação 2.73 e para obter a concentração à saída do recirculador, e de uma forma semelhante ao que é feito para o ciclone, são estabelecidos os balanços de material em cada zona do recirculador.

4.2.3 Ciclones de fluxo-invertido combinados com ciclones de recirculação com meios ionizados

Este modelo incide no estudo do efeito de um campo eléctrico para colecção de partículas em precipitadores electrostáticos, sendo feita a adaptação para os ciclones com recirculação estudados. De uma forma muito sucinta e genérica, pode-se considerar que para o caso em estudo, o fenómeno ocorre em dois passos:

1. Carregamento das partículas
2. Captura das partículas (recirculação destas ao ciclone Hurricane®)

Estes fenómenos já foram descritos em detalhe na Secção 2.4.

As partículas que estão carregadas são atraídas por um eléctrodo de captura com carga oposta, afastando-se do canal central de descarga de gases para a atmosfera, aumentando de forma substancial a quantidade de partículas que são recirculadas para o ciclone de fluxo-invertido.

Em termos de curva de eficiência teórica, considera-se que o impacto do campo eléctrico na captura do sistema é como se este apenas actuasse quando o sistema opera em estado pseudo-estacionário quando há recirculação mecânica. Tendo presente que se trata de uma simplificação, e no sentido de melhor descrever o que de facto ocorre

dentro do recirculador, considera-se que o fenómeno electrostático actua não só de uma forma consecutiva em relação ao da recirculação mecânica, mas também de uma forma competitiva, sendo esta realidade traduzida na equação 2.115.

Para o cálculo da eficiência do precipitador electrostático, são levadas várias realidades em linha de conta. A expressão para cálculo da eficiência é dada pela equação 2.113 caso a superfície de separação seja a parede do recirculador ou pela equação 2.114 caso a superfície de separação seja o cilindro central do precipitador. Ambas as expressões apresentadas são função de vários parâmetros geométricos, sendo ainda função da velocidade de migração das partículas electricamente carregadas.

Esta velocidade de migração é determinada pela equação 2.109 que, considerando algumas simplificações adequadas, se traduz na equação 2.110. Ainda que esta seja função de vários parâmetros, destacam-se a carga da partícula e o campo eléctrico a que esta está sujeita.

Focando na carga eléctrica das partículas, esta é dada pela equação 2.102, considerando válido o modelo de Cochet (1961). Esta expressão adopta uma forma em que se calcula a carga da partícula em função da sua carga de saturação, do tempo característico de carga e do tempo decorrido. Para cálculo do tempo característico de carga, considera-se válida a expressão 2.91.

Em relação à carga de saturação da partícula e à velocidade de migração, ambas são ainda função do campo eléctrico. Este é função de diversos parâmetros, mas poder-se-á dizer que um parâmetro que leva muitos destes em linha de conta é a densidade de corrente sendo o campo eléctrico função desta conforme é descrito pela equação 2.86.

Considerando ainda a presença de partículas no recirculador e o seu impacto no corrente obtida (supressão), traduz-se que a corrente obtida é função de um potencial efectivo dado pela equação 2.87.

4.3 Acoplamento da aglomeração interparticular

Este modelo baseia-se no modelo de Sommerfeld (2001) e Ho e Sommerfeld (2002) e incide no efeito de agregação de partículas em meios turbulentos. Neste trabalho foi feita a adaptação para os ciclones de fluxo-invertido estudados.

Apresenta-se na Figura 4.2 um esquema representativo do funcionamento interno, onde se evidenciam as duas principais zonas com impacto na simulação (losangos da figura): se ocorre colisão e caso ocorra, se ocorre aglomeração.

Analizando em maior detalhe a Figura 4.2, para o bom funcionamento do modelo, é necessário que todas as condições de operação, de simulação, geométricas, etc. sejam

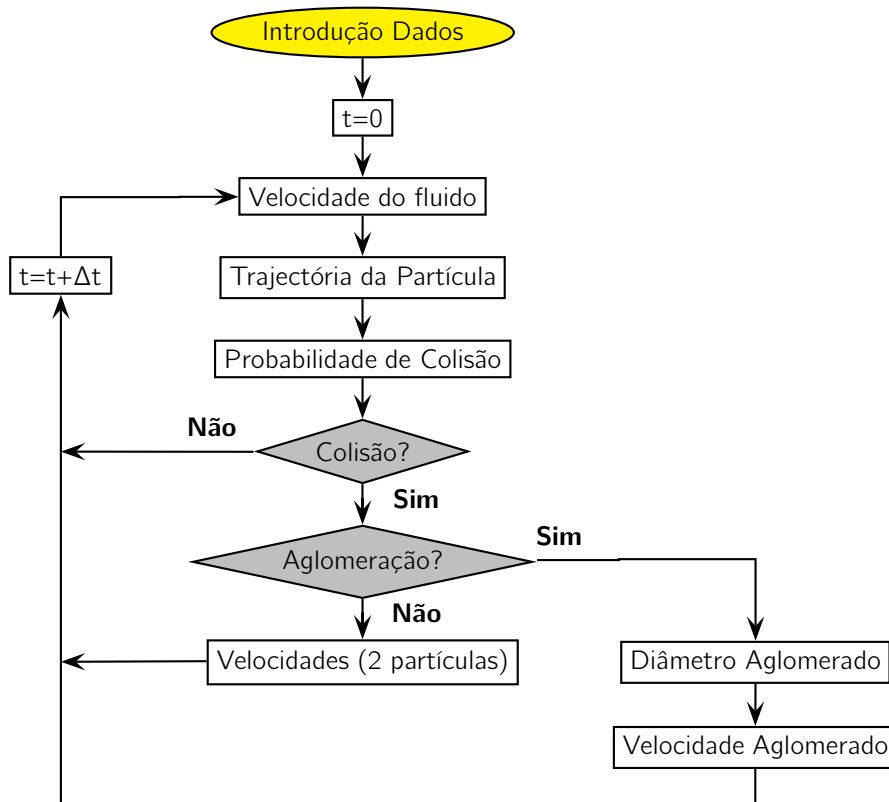


Figura 4.2 Representação em diagrama de fluxo do modelo de aglomeração interparticular destacando a fase de introdução de dados do modelo (elipse) e as fases de decisão do modelo (losangos)

fornecidas, estando identificadas como Introdução de Dados. Em seguida, o modelo começa por calcular a Velocidade do Fluido (levando em linha de conta a turbulência) e depois a Trajectória de cada uma das partículas inicialmente injectada. Analisando as trajectórias duas a duas, isto é, de uma forma binária, em função da Probabilidade de Colisão, o modelo define se ocorre Colisão e se/quando esta ocorre, resulta uma Aglomeração. Em função dos casos, o modelo calcula as novas características de velocidade, posição e dimensão das partículas ou do aglomerado resultante. A totalidade deste processo repete-se a cada passo de integração, até um tempo final de interacção definido ou pelo utilizador, ou pelas condições operatórias e geométricas da simulação.

Como nota de interesse, no Apêndice A apresenta-se a expansão do sistema de

equações integrado pelo modelo PACyc para obter as trajectórias das partículas em meio turbulento. Para tal, recorre-se ao *solver* DDASKP (Brown et al., 1994) e para garantir uma integração mais robusta, usam-se as derivadas parciais e respectiva matriz jacobiano do sistema neste apresentadas.

Focando no funcionamento do modelo, esta parte da análise da possibilidade de existência de aglomeração de partículas dentro do ciclone de fluxo-invertido e estuda o impacto desta aglomeração como justificação para a captura das partículas mais finas com eficiências anormalmente elevadas.

Uma das primeiras considerações feitas nesta análise é que se deverá analisar um volume de controlo igual (em dimensão e em forma) ao volume do ciclone e que nesse mesmo volume estão dispersas uniformemente partículas sólidas num fluido. Em todos os casos estudados, o fluido em causa era o ar, ainda que através da combinação das variáveis do modelo massa volúmica do fluido (ρ), da viscosidade do fluido (μ) e de massa molecular do fluido (M) se possam efectuar simulações com outros fluidos.

Para usar o modelo construído, é necessário fornecer dados de cinco tipos:

- **Dados de simulação:** quais os fenómenos a levar em linha de conta e respectiva configuração;
- **Dados geométricos:** geometria do ciclone e do recirculador (quando este último está presente);
- **Dados de operação:** condições operatórias (pressão, temperatura, ...);
- **Dados das partículas:** características das partículas (distribuição mássica, massa volúmica, área superficial, ...);
- **Dados da interacção interparticular:** características que determinam a análise das colisões (passo de interacção, tempo final de interacção, ...);

Conforme o caso a simular, estes dados são lidos pelo programa pela seguinte ordem:

1. Distribuição cumulativa;
2. Dados de partículas;
3. Dados do ciclone;
4. Dados de operação;
5. Dados de simulação;

6. Dados do recirculador (quando activo);
7. Dados do campo eléctrico (quando activo);
8. Dados de interacção (quando activo);

No Apêndice B apresentam-se exemplos dos vários ficheiros de dados do modelo PACyc, descrevendo em maior detalhe os dados mais relevantes.

Funcionamento intrínseco do modelo: Após a introdução dos dados necessários ao modelo, é calculada a velocidade do fluido presente no volume de controlo, sendo posteriormente estudadas as trajectórias individuais das partículas injectadas no volume de controlo.

Recorrendo às velocidades das partículas e às posições destas no ciclone, são estimadas as probabilidades de colisões binárias entre todas as partículas. Em função deste valor, opta-se por considerar que ocorreu ou não colisão entre duas partículas, podendo ocorrer uma de três situações:

1. **Não ocorre** colisão
2. **Ocorre** colisão e **Não Ocorre** aglomeração
3. **Ocorre** colisão e **Ocorre** aglomeração

No caso 1, o modelo não perturba as velocidades das duas partículas analisadas, reinjectando-as no próximo passo de tempo, mantendo as posições e as velocidades entre passos.

Quando ocorre colisão entre as duas partículas, o modelo calcula as interacções “reais” entre as partículas, podendo ocorrer ou não formação de um novo aglomerado de partículas, sendo isto definido (em grande parte) pela velocidade relativa entre as partículas que colidem.

Considerando o caso 2 (colisão sem aglomeração), o modelo recorrendo apenas às equações de conservação da quantidade de movimento, calcula as novas velocidades das duas partículas resultantes após interacção, reinjectando-as individualmente no passo seguinte.

No caso 3 (colisão com aglomeração), o modelo calcula as dimensões (diâmetro) do novo aglomerado (considerando para isso que este tem uma forma esférica) e a respectiva velocidade. Para isso o modelo leva em consideração não só as equações de conservação da quantidade de movimento mas também a equação de conservação de

massa, de forma a que o aglomerado fique na mesma posição que a partícula-alvo com características de velocidade determinadas pelas velocidades relativas das partículas.

Quando todas as partículas presentes no volume de controlo são injectadas, o modelo analisa o próximo passo de tempo, voltando a calcular a velocidade do fluido nas novas posições das partículas resultantes. Este processo repete-se até ao tempo final de interacção, ou até que não haja mais partículas dentro do volume de controlo.

4.3.1 Definição do volume de controlo

Após uma análise de uma versão preliminar do modelo, chegou-se à conclusão que este não descrevia de uma forma correcta o que realmente se pensa passar no ciclone, prevendo valores de eficiência fraccional superiores ao que realmente são obtidas na prática. Numa tentativa de aproximar os valores previstos pelo programa dos valores obtidos na realidade, foram implementadas várias soluções com sentido físico, no sentido de descrever mais correctamente o que se pensa acontecer na realidade e com o objectivo de diminuir o valor final da eficiência teórica prevista.

Uma primeira aproximação foi a redefinição do volume de controlo disponível para as colisões. Ainda que seja de presumir que existam colisões em todo o ciclone, nem todas as colisões são relevantes para o aumento da eficiência de captura de partículas. Assim sendo, são negligenciadas as colisões que ocorrem após o gás inverter o sentido o que equivale a dizer que apenas a zona apresentada a cinzento na Figura 4.3(a) foi considerada como volume de controlo. O principal impacto desta decisão é a diminuição do tempo de passagem de gás no volume de controlo de colisão, o que faz com que o fenómeno de aglomeração seja menos determinante.

Outra forma de simultaneamente aproximar o que se passa na realidade em termos de separação e de minimizar o valor da eficiência fraccional estimada pelo modelo, foi a “discretização” do ciclone, tornado o processo de separação gás-sólido num processo que acontece por etapas, e não apenas no total do ciclone. Com esta definição consegue-se ainda analisar a performance do ciclone no sentido axial, tornando a simulação em “pseudo-3D”.

Convém referir que para calcular a eficiência por fatia é feito um paralelismo com o calculo do rendimento de reacção de uma cascata de reactores, obtendo-se a equação 4.1, que permite saber qual a eficiência base de cada fatia, para que a eficiência final seja igual à prevista sem que o ciclone esteja discretizado, isto é, para que o valor de eficiência seja igual ao valor da linha de base ². Assim a eficiência de cada diâmetro (i)

²Eficiência prevista pelo modelo base sem aglomeração.

em cada fatia (η_i^{fatia}) é dada em função da eficiência final de cada diâmetro (η_i^{final}) e do número de fatias (N_{fatias}).

$$\eta_i^{fatia} = 1 - (1 - \eta_i^{final})^{\frac{1}{N_{fatias}}} \quad (4.1)$$

Esta simplificação foi introduzida considerando que o ciclone é composto por um determinado número de fatias, definindo-as por omissão e à falta de melhor critério, com altura igual à altura da entrada. Tendo em conta a geometria normal dos sistemas estudados e em função do tipo de entrada (circular ou rectangular) o número de fatias estava situado entre 10 e as 14 fatias e a cada fatia corresponde uma eficiência de remoção, conforme o apresentado na Figura 4.3(b). Sendo esta uma variável com elevado impacto nos resultados finais do modelo, o número de fatias passou a ser um parâmetro definido pelo utilizador, descartando nesta situação a aproximação do número de fatias ser determinado em função da altura da entrada no ciclone.

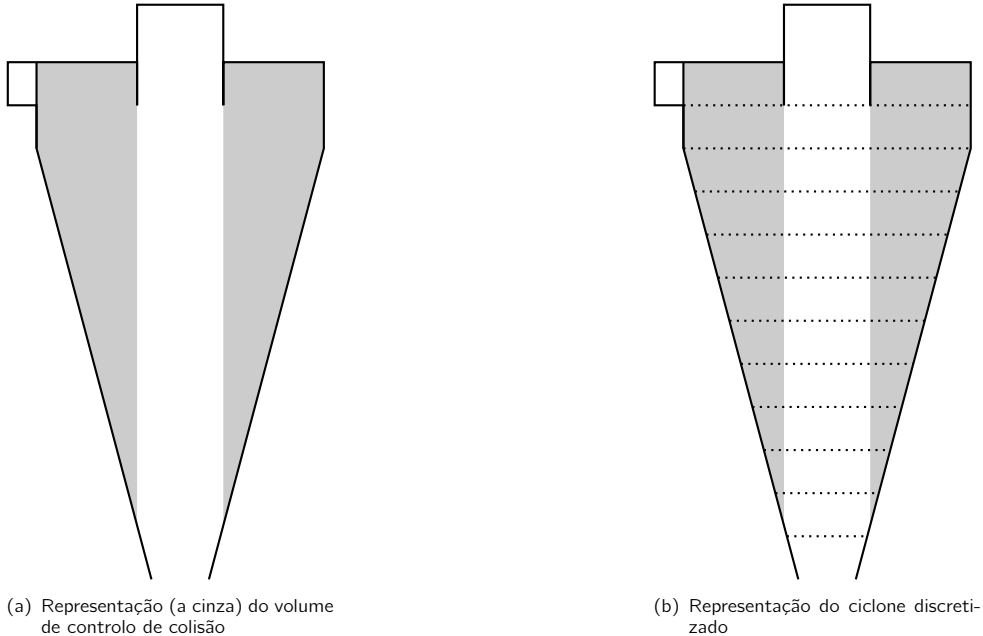


Figura 4.3 Definição do volume de controlo

Combinando as duas definições do volume de controlo, foi ainda estabelecida uma consideração adicional, que passa por considerar que as partículas que estão no vórtice

central escapam ao ciclone, não sendo reinjectadas no passo seguinte. Em relação à definição do limite exterior do ciclone, as partículas que colidem com a parede ficam indisponíveis para colisão, sendo removidas com a respectiva eficiência de remoção entre fatias. As partículas que não são removidas entre fatias, são reinjectadas na fatia seguinte.

No sentido de evidenciar de uma forma mais clara as propriedades que as partículas têm em função da sua posição no volume de controlo, apresenta-se na Figura 4.4 as três zonas com principal impacto nas propriedades das partículas.

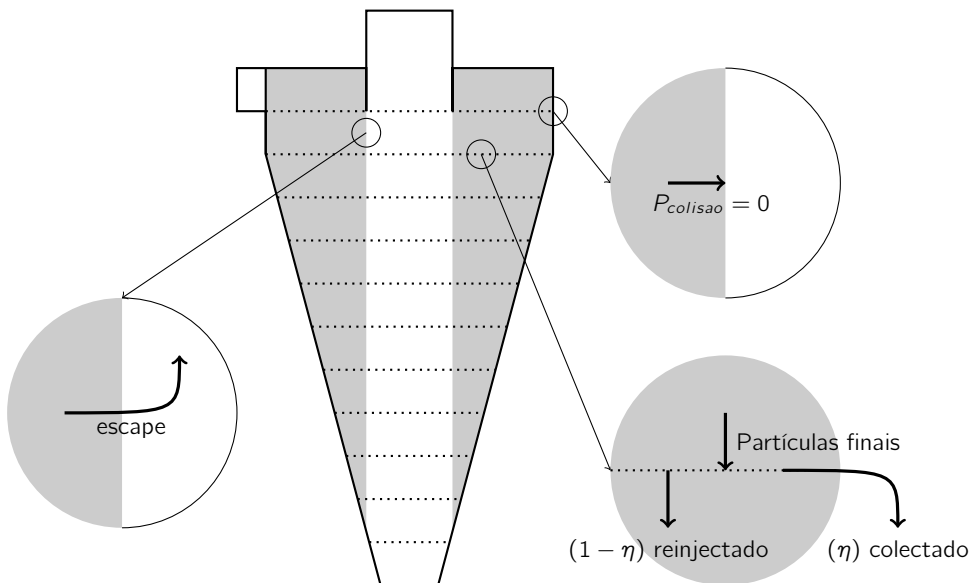


Figura 4.4 Propriedades das partículas em função da sua posição no volume de controlo

Zona 1 (Vórtice central): Quando as partículas entram na zona do vórtice central, considera-se que estas escapam na corrente gasosa ascendente, seja qual for o seu diâmetro ou a sua constituição.

Assim sendo, esta zona não faz parte do volume de controlo (identificado a cinza), uma vez que o impacto das eventuais colisões que ocorram dentro da zona do vórtice central é nulo para o aumento da eficiência de captura das partículas devido à aglomeração.

Zona 2 (Parede do ciclone): Às partículas que colidam com a parede do ciclone é atribuída uma probabilidade de colisão nula. Com isto, estas consideram-se fora do

volume de controlo de colisão, uma vez que, naquela fatia, estas nunca mais colidem com quaisquer outras partículas.

Assim sendo, uma partícula que colida com a parede do ciclone, determina as suas dimensões “finais” para ser processada entre fatias.

Zona 3 (Interface virtual entre as fatias): Nesta zona é feito o processamento das partículas que não escaparam no vórtice central, isto é, as partículas que estão dentro do ciclone e as partículas que colidiram com as paredes.

Usando a curva de eficiência fraccional da fatia, é feita a remoção de partículas conforme a respectiva eficiência de captura, enquanto que, as restantes partículas são reinjectadas na fatia seguinte.

Como nesta zona também são processadas as partículas que colidem com as paredes (com respectiva probabilidade de colisão nula para a fatia anterior), é nesta zona que se consegue a reinjecção de partículas que anteriormente estavam indisponíveis para aglomeração, tornando-as novamente partículas-alvo para aglomeração na fatia seguinte.

Conceito de sub-fatias/sectores: No sentido de estudar ainda em maior detalhe a discretização do ciclone, foi ainda introduzido o conceito de sub-fatia, sendo esta uma interface virtual dentro de cada fatia onde ocorria a separação e remoção de partículas. Vários exemplos da estrutura de várias sub-fatias são apresentados na Figura 4.5. Esta aproximação não levou a resultados satisfatórios, uma vez que em muitos dos casos as partículas passavam entre fatias, sem passarem pela sub-fatia. Isto era conseguido pela combinação do facto das partículas ou passarem pelo vórtice central (escapando ao ciclone) ou colidirem com a parede (ficando indisponíveis para colisão, logo fora do volume de controlo) antes de passarem na interface virtual de separação.

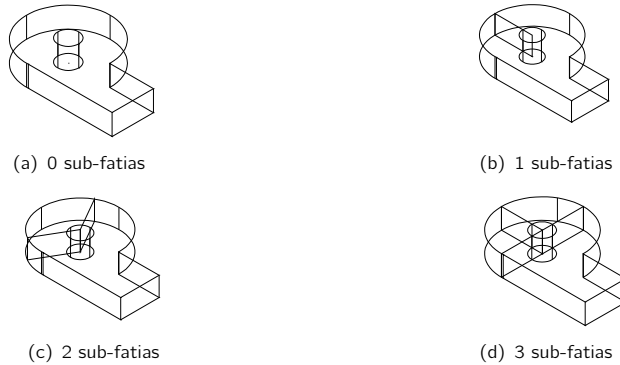


Figura 4.5 Cada fatia com sub-fatias/sectores

4.3.2 Pré-processamento da distribuição mássica

Antes de se processar a distribuição em termos de aglomeração, é necessário discretizar a distribuição mássica, obtendo-se a correspondente distribuição numérica. Uma das considerações feitas neste processo, é que todas as partículas são apresentadas pelo diâmetro médio da classe onde se inserem.

Para se proceder à discretização, é necessário saber a massa de partículas presente no ciclone em cada momento. Assim sendo, é calculado o volume do ciclone ($V_{ciclone}$), conforme a equação 2.9.

Conhecendo a concentração mássica das partículas (C), obtém-se o valor da massa total de partículas no ciclone (m_{total}), usando a equação 4.2.

$$m_{total} = V_{ciclone} \times C \quad (4.2)$$

Calcula-se o número real de partículas ($n_{real,i}$) dentro do ciclone, usando a equação 4.3, partindo da distribuição mássica inicial ($f_{w,i}$), do diâmetro médio de cada classe ($d_{p,i}$) e da massa volúmica das partículas (ρ_p).

$$n_{real,i} = \frac{f_{w,i} m_{total}}{\frac{\pi d_{p,i}^3 \rho_p}{6}}, i = 1 \dots N_{classes} \quad (4.3)$$

Com o número real de partículas, calculam-se vários subconjuntos de dados que são relevantes para o funcionamento do modelo. Entre eles, temos o número original em proporção ($n_{original,i}$), que apenas transforma proporcionalmente a distribuição numérica,

para que a classe que esteja em menor número, tenha apenas uma partícula. Em termos matemáticos, a transformação do número real de partículas, em número original em proporção é traduzida na equação 4.4.

$$n_{original,i} = \frac{n_{real,i}}{\min(n_{real,i}; i = 1 \dots N_{classes})}, i = 1 \dots N_{classes} \quad (4.4)$$

Com o número original, através da expressão 4.5 pode-se calcular a distribuição numérica relativa.

$$f_{n,i} = \frac{n_{real,i}}{\sum_{i=1}^{N_{classes}} (n_{real,i})}, i = 1 \dots N_{classes} \quad (4.5)$$

Nesta fase é introduzida uma simplificação no sentido de diminuir ainda mais o número de partículas, para evitar tempos de processamento de CPU inportáveis assim como uso de memória excessivo. É possível optar por uma de duas estratégias:

- Definir o diâmetro máximo injectado à partida (definido como diâmetro de truncatura (d_{trun}));
- Definir o número de partículas a injectar, usando para isso um processo de amostragem aleatória da distribuição numérica original;

Considerando a estratégia do diâmetro de truncatura, o número de partículas de cada classe a injectar no volume de controlo ($n_{injectar,i}$) é determinado pela equação 4.6.

$$n_{injectar,i} = \frac{n_{real,i}}{n_{real,d_{trun}}}, i = 1 \dots N_{classes} \quad (4.6)$$

Por outro lado a estratégia alternativa, isto é, a definição do número de partículas representativo a serem amostradas da distribuição numérica original, através de um processo de amostragem aleatória, é possível gerar um conjunto de distribuições numéricas que representem a distribuição numérica original.

Ambas as estratégias são equivalentes desde que o diâmetro de truncatura seja suficientemente elevado ou que o número de partículas representativas não seja demasiado pequeno.

Seja qual for a estratégia adoptada, com esta alteração de escala, o volume de controlo deve ser ajustado, para se manter a proporção de volume de partículas por volume

de gás. Isso é conseguido através do cálculo dessa proporção (α) inicial (conforme a equação 4.7), calculando em seguida o volume de partículas injectadas.

$$\alpha = \frac{V_{particulas}}{V_{fluido}} = \frac{C}{\rho_p} \quad (4.7)$$

Fazendo o quociente entre volume partículas injectadas e α , obtém-se o novo volume de controlo ($V_{controlo}$) conforme a expressão 4.8.

$$V_{controlo} = \frac{V_{part, inj}}{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{classes}} \frac{\pi}{6} n_{injectadas, i} d_{p, i}^3}{\alpha} \quad (4.8)$$

Apresenta-se na Tabela 4.1 os resultados de um caso simulado com uma concentração mássica de 500mg/m³ e um diâmetro de truncatura de 3.5µm (1356 partículas resultantes) ou amostragem aleatória de 1356 partículas.

Tabela 4.1 Exemplo de resultados de discretização após pré-processamento

D (µm)	fw %	fn %	n_{real}	$n_{original}$	$n_{injectado}$	$n_{injectado}$
					D_{trun}	Aleatória
0.115	0.60	84.641	6.5E+11	314026	1150	1134
0.265	0.24	2.767	2.1E+10	10265	37	43
0.350	0.33	1.651	1.2E+10	6126	22	27
0.450	0.69	1.624	1.2E+10	6027	22	20
0.575	3.44	3.882	2.9E+10	14403	52	55
0.725	1.71	0.963	7.4E+09	3571	13	19
0.900	4.34	1.277	9.8E+09	4738	17	15
1.250	16.80	1.845	1.4E+10	6846	25	27
1.750	20.55	0.823	6.3E+09	3052	11	9
2.500	32.40	0.445	3.4E+09	1650	6	6
3.500	14.70	0.073	5.6E+08	272	1	1
4.500	3.67	0.009	6.6E+07	32	0	0
7.500	0.53	0.000	2.0E+06	1	0	0

No sentido de permitir a comparação directa entre as curvas de eficiência fraccional com e sem aglomeração, após o processo de aglomeração todas os aglomerados formados são atribuídos às classes inicialmente existentes na distribuição mássica.

É possível constatar que para este caso a amostragem aleatória e o diâmetro de truncatura levam a discretizações muito próximas, o que está de acordo com o que era previsto.

4.3.3 Contextualização, reconstrução do histórico das partículas e cálculo das eficiências finais

Este tópico é onde o modelo PACyc é totalmente inovador uma vez que o modelo permite fazer um estudo do histórico das partículas iniciais até às partículas finais (após aglomeração) e com este histórico, consegue-se saber o que aconteceu ao longo do ciclone às partículas injectadas.

Considerando a aglomeração no ciclone, assume-se que esta é um processo que ocorre ao longo do ciclone, permitindo que exista acção cumulativa da aglomeração, ao mesmo tempo que existe remoção de partículas.

Com esta abordagem, obtém-se novas curvas de eficiência de remoção do ciclone, uma vez que devido ao aumento de tamanho das partículas pequenas, estas têm uma eficiência de captura maior do que previsto sem a presença de aglomeração.

No decorrer do processo de simulação das interacções interparticulares são escritos vários ficheiros, com informação relevante na reconstrução do histórico de cada partícula. O modelo escreve sempre na raiz do directório onde o modelo corre, os seguintes ficheiros:

- `eficiencia_inicial.res`: o modelo escreve a eficiência fraccional prevista pelo modelo de Mothes e Löffler (1988); neste ficheiro temos a linha de base sem aglomeração para o modelo PACyc; trata-se de uma matriz com $N_{classes} \times 2$;
- `eficiencia_final.res`: o modelo escreve a eficiência fraccional final, calculada após a reconstrução do histórico, sendo este um dos principais resultados do modelo PACyc; trata-se de uma matriz com $N_{classes} \times 2$;
- `eficiencia_global.res`: o modelo, recorrendo à distribuição mássica à entrada (sem aglomeração), calcula a eficiência global prevista pelo modelo de Mothes e Löffler (1988) e pelo modelo PACyc; trata-se de um vector com 2×1 ;
- `historico_diametros_novos.res`: neste ficheiro é guardado um histórico da constituição de cada diâmetro novo criado, quando duas partículas colidem e geram uma partícula com um diâmetro que ainda não exista até ao momento dessa colisão; trata-se de uma matriz com $(N_{diametros}^f - N_{classes}) \times 3$;

Quando o modelo discretiza o volume de controlo, os seguintes ficheiros são escritos, por unidade discretizada (fatia):

Distribuição mássica

- `distribuicao_massica_cumulativa_inicial.res`: este ficheiro apresenta a distribuição mássica cumulativa à entrada da fatia correspondente; trata-se de uma matriz com $N_{classes} \times 2$;
- `distribuicao_massica_cumulativa_final.res`: este ficheiro apresenta a distribuição mássica cumulativa à saída da fatia correspondente; trata-se de uma matriz com $N_{classes} \times 2$;
- `distribuicao_massica_inicial.res`: este ficheiro apresenta a distribuição mássica não cumulativa à entrada da fatia correspondente; trata-se de uma matriz com $N_{classes} \times 2$;
- `distribuicao_massica_final.res`: este ficheiro apresenta a distribuição mássica não cumulativa à saída da fatia correspondente; trata-se de uma matriz com $N_{classes} \times 2$;

Distribuição numérica

- `distribuicao_numerica_pre_interacao.res`: este ficheiro contém a distribuição numérica injectada na fatia; trata-se de uma matriz com $N_{classes} \times 2$;
- `distribuicao_numerica_relativa_pre_interacao.res`: este ficheiro contém a distribuição numérica relativa injectada na fatia; trata-se de uma matriz com $N_{classes} \times 2$;
- `distribuicao_numerica_pos_interacao_sem_tratamento.res`: este ficheiro tem a distribuição numérica associada aos diâmetros originais assim como os diâmetros criados na fatia correspondente; trata-se de uma matriz com $N_{diâmetros}^f \times 2$;
- `distribuicao_numerica_pos_interacao_com_tratamento.res`: este ficheiro tem a distribuição numérica após interacção, agrupando os números das partículas criadas nas classes iniciais; trata-se de uma matriz com $N_{classes} \times 2$;

Eficiência fraccional

- `eficiencia_por_diametros_resultantes.res`: este ficheiro contém a eficiência prevista por Mothes e Löffler (1988) para todos os diâmetros presentes (isto é, existentes e criados) na fatia; trata-se de uma matriz com $N_{diametros}^f \times 2$;
- `eficiencia_teorica_inicial.res`: é apresentada a eficiência fraccional inicial calculada pela expressão 4.1, sendo esta linha de base para a fatia; com a actual formulação do modelo, esta linha de base é constante para todas as fatias que constituem o ciclone; trata-se de uma matriz com $N_{classes} \times 2$;
- `eficiencia_teorica_final.res`: este ficheiro contém a eficiência fraccional final, calculada após reconstrução do histórico das partículas; trata-se de uma matriz com $N_{classes} \times 2$;

Informação das partículas

- `alteracao_particulas.res`: este ficheiro guarda sob a forma matricial informação acerca da alteração que cada classe sofreu; esta matriz tem o formato $N_{classes} \times N_{diametros}^f$ e identifica em que diâmetro final ficou colocada cada partícula injectada;
- `constituicao_particulas.res`: este ficheiro guarda sob a forma matricial o processamento de cada um dos diâmetros criados; esta matriz tem o formato $N_{diametros}^f \times N_{classes}^i$ e identifica por que partículas é constituído cada diâmetro final;
- `historico_particulas_diametro.res`: neste ficheiro guardam-se todas as colisões que resultam em aglomeração efectiva, estando identificado o diâmetro da partícula injectada e da partícula alvo; é uma matriz $N_{aglomerados}^{Total} \times 3$;
- `particulas_finais.res`: neste ficheiro guardam-se a transformação que cada partícula sofre nesta fatia; cada partícula é identificada e registada a sua identificação (em termos de diâmetro) final; é uma matriz $N_{particulas}^f \times 2$

Com a informação guardada nos ficheiros anteriores, é possível fazer a reconstrução total do histórico das partículas.

Para tal, o modelo começa por construir o ficheiro `constituicao_particulas.res`. Neste guarda-se a constituição de cada partícula, identificando cada uma das partículas que constituem um qualquer diâmetro.

Para isso é simultaneamente registado num outro ficheiro a constituição de cada diâmetro criado. Essa informação é registada no ficheiro `historico_diametros_novos.res`. Como exemplo, considera-se que duas partículas da primeira classe colidem e formam um aglomerado. Tendo em conta que este aglomerado tem um diâmetro que inicialmente não existia na distribuição, esta colisão com aglomeração gera o diâmetro identificado por $n + 1$, onde n é o número de diâmetros iniciais da distribuição não cumulativa. Essa combinação de partículas, isto é, qualquer colisão entre duas partículas de primeira classe que formem um aglomerado, darão origem a uma partícula pertencente ao diâmetro $n + 1$.

Apresenta-se na Tabela 4.2 a informação presente nesse ficheiro, onde se mostra a forma como é armazenada a informação relativa à ordem de criação de novos diâmetros, assim como a identificação de cada diâmetro gerado e a correspondente constituição binária. Nesta Tabela é visível a criação do diâmetro 14 a partir da colisão de duas partículas da classe 1, assim como a formação do diâmetro 15 a partir de uma partícula da classe 1 e uma partícula da classe 2, a formação do diâmetro 16 a partir de uma partícula da classe 1 e de uma partícula da classe 5, e ainda a formação do diâmetro 31 a partir de uma partícula da classe 4 e de uma partícula da classe 8. Focando no caso particular do diâmetro 14, nesta situação, qualquer aglomerado de duas partículas com o diâmetro 1 resultam sempre numa partícula com diâmetro 14.

Tabela 4.2 Geração de alguns dos primeiros diâmetros

Ordem do Diâmetro Criado	Identificação		
	do Diâmetro Criado	Partícula A	Partícula B
1	14	1	1
2	15	1	2
3	16	1	5
...	...	...	...
18	31	4	8
...	...	...	...

Existem três tipos de colisões binárias a considerar: partículas com partículas (já observadas na Tabela 4.2), partículas com aglomerados e aglomerados com aglomerados. Na Tabela 4.3 são evidenciados estes dois últimos tipos de combinações binárias.

Analisando em detalhe a Tabela 4.3, o diâmetro 120 é conseguido quando uma

Tabela 4.3 Exemplos colisões “ternárias” e “quaternárias”

Ordem do	Identificação		
Diâmetro	do Diâmetro	Partícula	Partícula
Criado	Criado	A	B
...	...	...	...
107	120	1	14
108	121	14	31
...	...	...	...

partícula de diâmetro 1 aglomera com uma partícula de diâmetro 14. Tendo presente a informação presente na Tabela 4.2, esta partícula com diâmetro 14 é constituída por duas partículas da classe 1. Assim sendo, pode-se concluir que o diâmetro 120 é obtido através da aglomeração de 3 partículas da classe 1. Esta partícula resultou assim de uma combinação ternária de partículas.

É ainda evidenciado outro exemplo de combinação de maior nível. O diâmetro 121 é conseguido quando um aglomerado de diâmetro 14 aglomera com uma partícula de diâmetro 31. Conforme o exemplo anterior, a partícula com diâmetro 14 é constituída por duas partículas da classe 1 e a partícula de diâmetro 31 é constituída por uma partícula da classe 4 e outra da classe 8. Assim sendo, pode-se concluir que o diâmetro 121 é obtido através da aglomeração de 4 partículas, duas da classe 1, uma da classe 4 e outra da classe 8. Esta partícula resultou assim de uma combinação quaternária de partículas.

O modelo de aglomeração consegue fazer combinações de nível mais elevado, estando apenas limitado às combinações que ocorram dentro do volume de controlo. Numa situação limite, com tempos de interacção na ordem dos vários segundos, o modelo conseguiria aglomerar todas as partículas numa só, sendo esta constituída por todas as partículas iniciais. No caso dos ciclones estudados, esta situação nunca ocorre pois:

- O tempo de interacção é $\ll 1$ seg;
- Existe remoção de partículas ao longo do eixo axial do ciclone;
- As partículas ficam indisponíveis para aglomeração, em cada fatia, após colidirem com a parede do ciclone;

Com a informação apresentada, constrói-se uma base de dados que poderá ser transformada numa estrutura matricial, onde é armazenada a informação da constituição de

cada diâmetro. Na Tabela 4.4 apresenta-se a estrutura matricial que traduz a constituição de cada diâmetro (existente ou criado) em função dos diâmetros existentes. Essa informação está contida no ficheiro `constituicao_particulas.res`.

Analisando em detalhe a Tabela 4.4, cada coluna corresponde a um diâmetro existente (no caso 13 colunas), e cada linha corresponde a um diâmetro existente ou criado (no caso, as 13 primeiras linhas correspondem a diâmetros existentes enquanto as restantes correspondem a diâmetros criados). Desta Tabela é possível constatar directamente a constituição de cada diâmetro, desde casos correspondentes a partículas simples (linhas 1 a 13), a casos de aglomerados binários (linhas 14 a 17 e 31), casos de aglomerados ternários (linha 120) e aglomerados quaternários (linha 121).

Ainda que se saiba a constituição de cada aglomerado formado, é necessário que cada colisão que resulta na criação de uma nova partícula seja registada. Isto é feito no ficheiro `historico_particulas_diametro.res` conforme o apresentado na Tabela 4.5. A identificação do diâmetro criado é conforme a lista de diâmetros criados no ficheiro `historico_diametros_novos.res`, já apresentado nas Tabelas 4.2, 4.3 ou na coluna ID da Tabela 4.4.

A Tabela 4.5 apresenta que o 2º e o 104º aglomerados formados foram obtidos através da combinação de uma partícula da classe 1 e de uma partícula da classe 2, gerando um aglomerado identificado com diâmetro 15. Analogamente é possível constatar que o 3º, 4º e 101º aglomerados formados foram obtidos através da combinação de uma partícula da classe 1 e de uma partícula da classe 5, gerando um diâmetro identificado por 16. Como nota comum entre as Tabelas 4.2, 4.3 e 4.5, é ainda evidenciado que a partícula A é sempre a injectada (logo a correspondente a um diâmetro mais pequeno) e a partícula B é sempre a partícula-alvo (correspondente a um diâmetro maior).

Para calcular a eficiência de cada diâmetro usa-se a linha de base calculada pelo modelo proposto por Mothes e Löffler (1988), criando um vector com as eficiências correspondente a cada diâmetro (pré-existente ou gerado). Esta informação é impressa para o ficheiro `eficiencia_por_diametros_resultantes.res` conforme o apresentado na Tabela 4.6. Nesta Tabela é apresentada a identificação do diâmetro, o valor do diâmetro da partícula e a correspondente eficiência de captura.

A Tabela 4.6 é constituída por 3 colunas: a primeira é a identificação do diâmetro conforme a coluna ID da Tabela 4.4; a segunda é diâmetro da partícula da classe correspondente à linha da Tabela 4.4; a terceira é o valor (em percentagem) da eficiência de captura do diâmetro correspondente. Assim sendo, através do cruzamento da informação entre os ficheiros `constituicao_particulas.res` e `eficiencia_por_diametros_resultantes.res` é possível retirar algumas conclusões:

Tabela 4.4 Constituição de cada diâmetro

	ID	CLASSES INICIAIS												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
CLASSES INICIAIS	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	6	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
	8	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
	9	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
AGLOMERADOS FORMADOS	14	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	16	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	17	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	31	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	120	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	121	2	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

- Caso partícula simples: ao diâmetro identificado como 1, corresponde um diâmetro de $\approx 0.115\mu\text{m}$, com uma eficiência de $\approx 0.034\%$ e é composto por uma partícula da classe 1;
- Caso partícula binária: ao diâmetro identificado como 31, corresponde um diâ-

Tabela 4.5 Registo de cada colisão de cada diâmetro

Ordem do Aglomerado Formado	Partícula A	Partícula B	Identificação do Diâmetro Formado
1	1	1	14
2	1	2	15
3	1	5	16
4	1	5	16
5	1	11	17
...	...	...	...
101	1	5	16
102	7	9	39
103	3	7	40
104	1	2	15
105	1	8	20
...	...	...	...

metro de $\approx 1.269\mu\text{m}$, com uma eficiência de $\approx 1.205\%$ e é composto por uma partícula da classe 4 e outra da classe 8;

- Caso partícula ternária: ao diâmetro identificado como 120, corresponde um diâmetro de $\approx 0.167\mu\text{m}$, com uma eficiência de $\approx 0.0472\%$ e é composto por três partículas da classe 1;
- Caso partícula quaternária: ao diâmetro identificado como 121, corresponde um diâmetro de $\approx 1.270\mu\text{m}$, com uma eficiência de $\approx 1.207\%$ e é composto por duas partículas da classe 1, uma partícula da classe 4 e outra da classe 8;

Analisando os valores de eficiência, constata-se ainda que as partículas do diâmetro 31 e do diâmetro 121 ainda que tenham composições diferentes, têm praticamente a mesma eficiência. Este facto tem grande impacto nos resultados, uma vez que o diâmetro 121 também é constituído por duas partículas da classe 1, cuja eficiência de captura “isolada” é muito inferior do que quando estas estão aglomeradas, formando partículas maiores. Assim, essas duas partículas da classe 1, têm uma eficiência de

Tabela 4.6 Diâmetro de cada partícula e correspondente eficiência inicial (por fatia)

	Identificação do Diâmetro	Diâmetro (μm)	Eficiência de Captura (%)
CLASSES INICIAIS	1	0.115	0.034
	2	0.265	0.077
	3	0.350	0.112
	4	0.450	0.165
	5	0.575	0.250
	6	0.725	0.384
	7	0.900	0.584
	8	1.250	1.165
	9	1.750	2.616
	10	2.500	6.614
	11	3.500	10.961
	12	4.500	14.364
	13	7.500	21.670
AGLOMERADOS FORMADOS	14	0.145	0.042
	15	0.272	0.080
	16	0.577	0.252
	17	3.500	10.961
	...	...	...
	31	1.269	1.205
	...	...	...
	120	0.167	0.047
	121	1.270	1.207
	...	...	...

captura aproximadamente igual a uma partícula da classe 8 isolada, ou da combinação de uma partícula da classe 4 e uma partícula da classe 8.

Através da combinação dos ficheiros `constituicao_particulas.res` e `historico_o_particulas_diametro.res` é construído o ficheiro `alteracao_particulas.res` e a correspondente matriz *INFO*. Neste ficheiro guarda-se a informação da localização final

de cada partícula em cada um dos diâmetros (existente ou criado). No final, obtém-se numa forma matricial que quantidade de partículas de um diâmetro i se comportam como partículas de diâmetro j . Neste ficheiro:

- O número de linhas é igual ao número de classe iniciais;
- O número de colunas é igual ao número de diâmetros finais após aglomeração;
- A soma por linha é igual ao número de partículas inicialmente injectadas de cada classe;

Apresenta-se esta estrutura na Figura 4.6, onde no eixo dos xx temos as classes finais, no eixo dos yy temos a classe inicial das partículas e o tamanho relativo de cada um dos círculos preenchidos apresenta a fracção volúmica das partículas. Para $t = 0$, a totalidade das partículas estão nas classes iniciais. Conforme o tempo evolui, a percentagem de partículas das classes iniciais que se comportam como se pertencessem a outra classe são identificadas pela razão entre as áreas a azul e a das circunferências sem preenchimento. Além disso, evidencia-se nos círculos a vermelho a quantidade de partículas que escapam no vórtice central ou são capturadas (E+C) no ciclone. É possível observar nas Figuras 4.6(b) a 4.6(f) que:

1. Há uma deslocação das partículas das classes mais pequenas no sentido das partículas das classes maiores;
2. Há remoção de partículas ao longo do tempo desde o início, sendo disto exemplo a evolução entre a Figura 4.6(b) e a Figura 4.6(c) para as partículas com classe inicial 12 que são muito rapidamente capturadas;
3. Não há conservação de massa ao longo do processo dentro do ciclone, sendo isto visível claramente na Figura 4.6(f), onde é evidente que os círculos vermelhos das classes maiores representam a totalidade das partículas, que neste caso implica que estas partículas estejam fora do volume de controlo;

Conjugando esta informação com a correspondente eficiência, é calculada a eficiência final ponderada de cada um dos diâmetros iniciais. Esta eficiência é calculada usando a expressão 4.9, onde $\eta_i^{final,*}$ é a eficiência final após aglomeração de uma partícula pertencente à classe i , $INFO_{ij}$ é uma estrutura onde esta armazenada toda a informação acerca do número de partículas da classe i que de alocaram na classe j , η_j^{fatia} é a eficiência por fatia de cada diâmetro j , $n_{i,j}$ é o número de partículas i na classe j ,

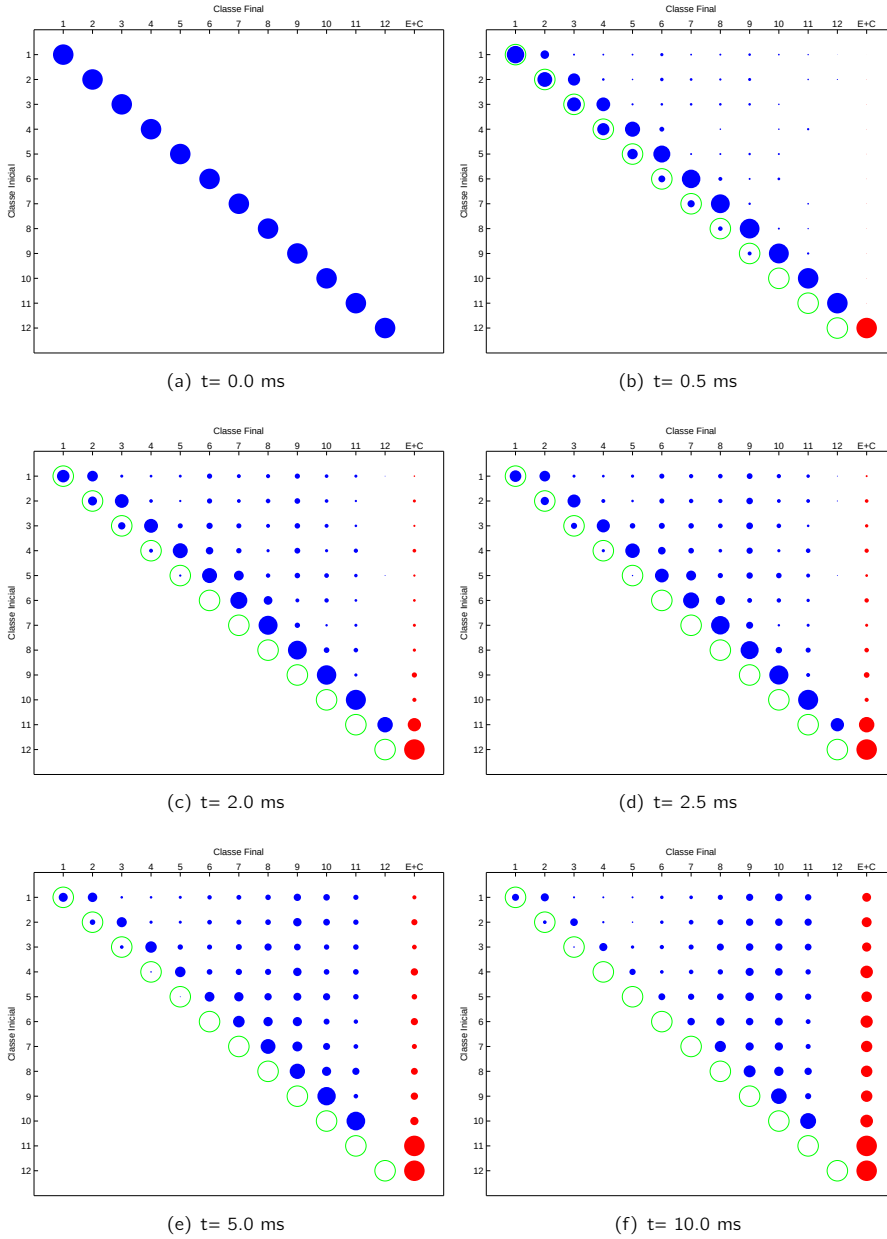


Figura 4.6 Proporção de partículas finais por cada uma das classes iniciais (matriz)

$D_{inicial,i}$ e $D_{final,i}$ são respectivamente o diâmetro mais pequeno e maior que pertencem

à classe i e $N_{classes}$ é o número original de classes.

$$\eta_i^{final,*} = \frac{\sum_{j=D_{inicial,i}}^{D_{final,i}} INFO_{i,j} \times \eta_j^{fatia}}{\sum_{j=D_{inicial,i}}^{D_{final,i}} n_{i,j}}, i = 1 \dots N_{classes} \quad (4.9)$$

4.4 Apresentação de resultados do modelo PACyc

Tendo presente que embora o modelo PACyc permita o estudo integral do sistema estudado (ciclone isolado, ciclone com recirculação mecânica e ciclone com recirculação electrostática), as conclusões acerca do impacto de cada uma das variáveis estudadas são válidas seja qual for a configuração do sistema. Assim sendo, como exemplos dos resultados do modelo PACyc, nesta Secção apenas se apresentam os resultados obtidos quando se considera o funcionamento isolado do ciclone, uma vez que este é o caso que traduz de uma forma mais simples e directa os resultados do modelo.

Apresentam-se ainda alguns resultados intermédios de forma a tornar mais evidente alguns dos princípios anteriormente enunciados.

Todos os resultados são obtidos em função da combinação dos diversos parâmetros do modelo anteriormente apresentado, sendo identificado um caso de referência, assim como a linha de base sem aglomeração quando esta é considerada relevante.

No sentido de mostrar de uma forma mais global o impacto dos parâmetros mais relevantes para o modelo de aglomeração e do modelo PACyc, apresentam-se estudos de sensibilidade paramétrica a cada um dos parâmetros individualmente, assim como alguns casos combinatoriais relevantes. Em relação à capacidade de previsão do modelo para casos experimentais, esta será objecto de estudo em detalhe no Capítulo 5.

4.4.1 Resultados intermédios

No sentido de facilitar a percepção do funcionamento interno do modelo PACyc assim como destacar alguns dos princípios enunciados anteriormente, são apresentadas na Figura 4.7 a trajectória e correspondentes velocidades de uma partícula em meio turbulento e na Figura 4.8 a formação de uma aglomerado dentro de um volume de controlo cúbico.

Para calcular a probabilidade de colisão entre duas partículas, o modelo necessita que as respectivas velocidades (magnitudes e sentidos) sejam calculadas. Usando estas velocidades e a respectiva posição da partícula na Figura 4.7 é demonstrada uma trajectória de uma partícula de 1 μm dentro do campo turbulento onde as partículas estão

inseridas. Esta representação foi feita em 3D de forma a tornar mais evidente o percurso turbulento da partícula.

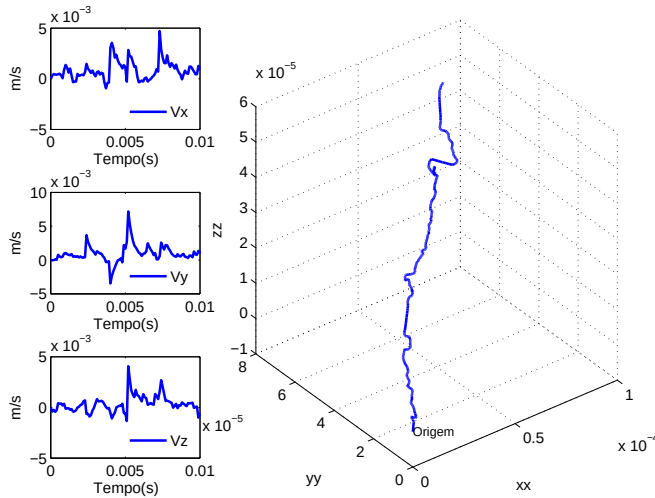


Figura 4.7 Trajectória-tipo de uma partícula de diâmetro 1 μm em meio turbulento. Representação num volume de controlo cúbico

A Figura 4.7 apresenta a evolução espacial da partícula num volume de controlo cúbico. Nas representações 2-D são apresentadas as velocidades lineares da partícula em cada uma das direcções dos 3 eixos coordenados. A trajectória turbulenta da partícula é evidenciada de duas formas distintas: em termos de oscilação das magnitudes das componentes da velocidade da partícula ou em termos do movimento da partícula no espaço tridimensional.

Por outro lado, considerando um exemplo onde ocorra colisão, são apresentadas na Figura 4.8(a) trajectórias de duas partículas com tamanhos diferentes e apresenta-se uma pseudo-colisão (uma vez que esta ocorrer ou não é determinado por um critério probabilístico e não determinístico). Na Figura 4.8(a) a trajectória descendente (a azul, partícula B) corresponde a uma partícula com um diâmetro de 0.26 μm enquanto a trajectória ascendente (a vermelho, partícula A) corresponde a uma partícula com um diâmetro de 5 μm . Estas trajectórias são resultado directo da resolução das equações 3.42 a 3.45.

Analisando as trajectórias das partículas individualmente, a trajectória da partícula mais pequena (partícula B) é mais aleatória do que a trajectória da partícula maior (partícula A), sendo possível concluir que a partícula mais pequena é mais afectada pelo meio turbulento. Em relação à trajectória do aglomerado formado (partícula C), esta

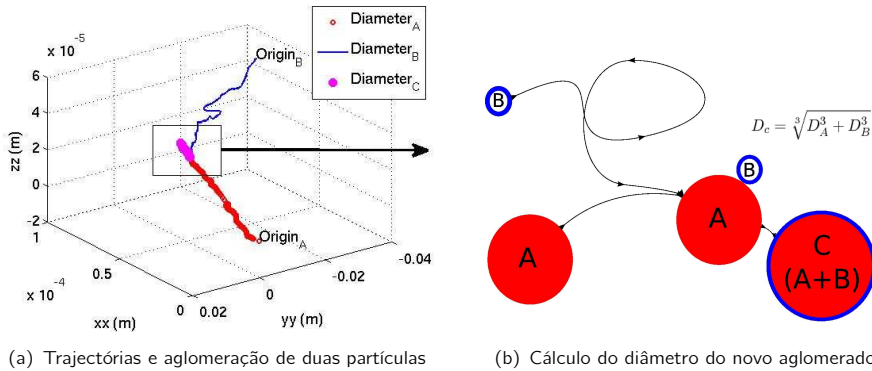


Figura 4.8 Trajectórias com aglomeração e correspondente processamento do aglomerado formado

é semelhante à da partícula maior uma vez que esta é calculada através da resolução das equações de quantidade de movimento, e a partícula maior tem mais quantidade de movimento do que a partícula mais pequena.

O propósito da Figura 4.8(b) é a apresentação de uma das simplificações introduzidas quando duas partículas aglomeram. Considerando a conservação de massa, o diâmetro do novo aglomerado é calculado considerando que este é esférico, conforme a equação apresentada na Figura, sendo evidenciado a vermelho o núcleo correspondente à partícula A e a azul a zona periférica do aglomerado correspondente à partícula B. Como é óbvio, esta é uma simplificação que deverá ser refinada numa próxima evolução do modelo, tal como já aflorado por Lipowsky e Sommerfeld (2008).

4.4.2 Análise das distribuições de tamanho das partículas

Como já foi referido anteriormente, a distribuição mássica cumulativa inicial é um dos dados de entrada do modelo. Após conversão na correspondente distribuição mássica não cumulativa inicial, o modelo converte a informação nela contida na correspondente distribuição numérica absoluta, considerando neste ponto que as partículas são esféricas e que estas são bem representadas por partículas com diâmetros iguais aos diâmetros centrais de cada uma das classes iniciais.

Após estudar o impacto da aglomeração nas curvas de eficiência fraccionais, o modelo usando a distribuição numérica final recalcula a distribuição mássica correspondente. Os princípios por trás deste processo são equivalentes aos que serão evidenciados na Secção 4.5.2 no tópico respeitante ao pós-processamento.

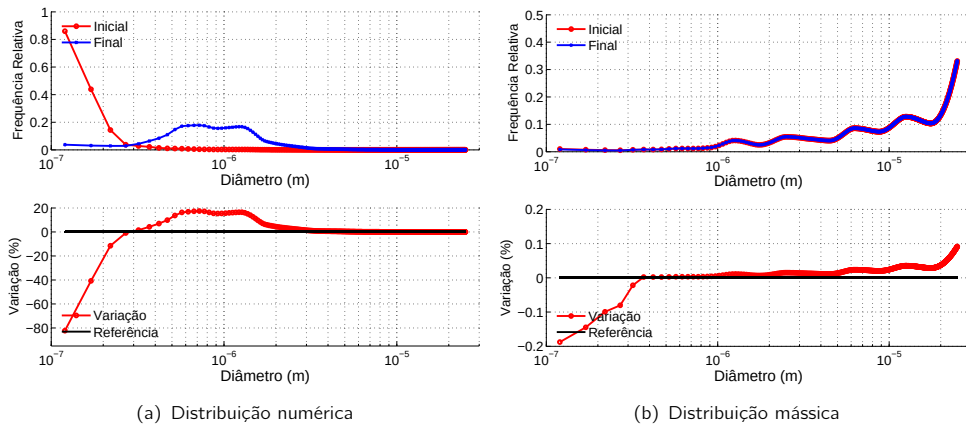


Figura 4.9 Distribuições de tamanho de partículas pré e pós-aglomeração

A Figura 4.9(a) apresenta a distribuição numérica inicial (pré-aglomeração) e final (pós-aglomeração) enquanto a Figura 4.9(b) apresenta a distribuição mássica inicial (pré-aglomeração) e final (pós-aglomeração).

A Figura 4.9(a) mostra uma redução clara no número de partículas mais pequenas e o correspondente aumento no número de partículas nas classes seguintes. Na distribuição numérica a deslocação para a direita (das partículas para as classes maiores) não é visível, daí a apresentação da corresponde distribuição mássica (Figura 4.9(b)).

Nesta Figura 4.9(b) é visível que a classe modal no início corresponde à primeira classe (correspondente a um diâmetro médio de $25 \mu\text{m}$). Após o processamento feito pelo modelo, é possível observar um deslocamento das partículas mais pequenas (abaixo de $0.4 \mu\text{m}$) para diâmetros maiores ($> 1 \mu\text{m}$). Isto permite mostrar que as partículas pequenas estão a desaparecer (a variação das primeiras 4 classes é negativa) e que as partículas maiores estão a ser formadas (a variação das classes seguintes é positiva). Neste exemplo, é evidenciado que uma grande variação do número de partículas pequenas (caso da primeira classe com -80%) não se traduz numa grande variação em massa ($\approx -0.2\%$), e que uma pequena variação em número das partículas grandes (caso da última classe com $\approx 0.001\%$) se traduz numa variação relativamente mais significativa em termos de massa ($\approx 0.1\%$).

4.4.3 Cálculo da dispersão turbulenta

No sentido de prever o funcionamento do ciclone é necessário estimar o coeficiente de dispersão turbulenta. Como já foi referido anteriormente, existem cinco situações possíveis, baseando as estimativas num dos seguintes modelos predictivos:

1. O modelo de Li e Wang (1989)
2. O modelo de Lorenz (1994)
3. O modelo de Ogawa (1999)
4. O modelo de Salcedo e Coelho (1999)

A Figura 4.10 evidencia as curvas de eficiência fraccional sem aglomeração conforme o valor da dispersão turbulenta varia. As diferentes séries estão identificadas com o correspondente valor da dispersão turbulenta. Neste exemplo, as séries estão ordenadas no sentido ascendente do valor da dispersão turbulenta e é possível constatar que quanto maior for o coeficiente de dispersão, pior é a performance do ciclone, estando estes resultados de acordo com outros fenómenos onde a dispersão é determinante, como o caso das curvas de *breakthrough* em cromatografia.

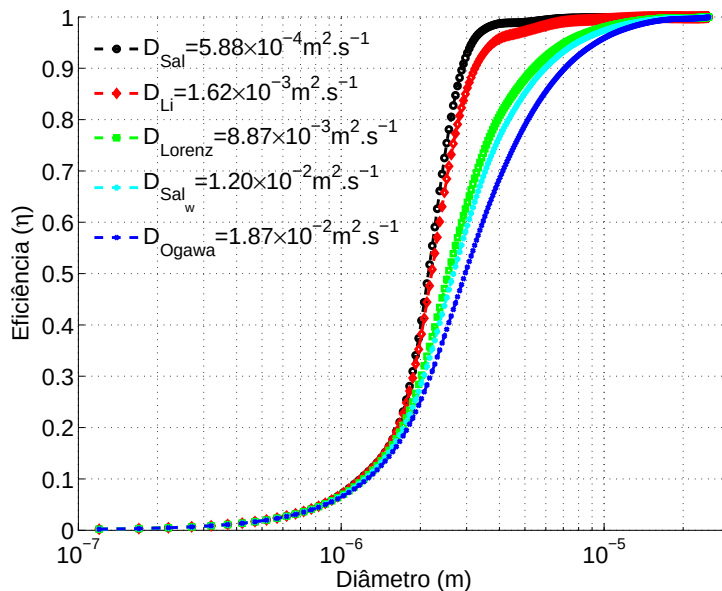


Figura 4.10 Análise de sensibilidade - dispersão turbulenta

Na Tabela 4.7 apresenta-se a síntese das eficiências globais base para os casos apresentados na Figura 4.10.

Tabela 4.7 Eficiências globais (sem aglomeração) em função da dispersão turbulenta

Caso	Base (%)
Li e Wang (1989)	85.21
Lorenz (1994)	81.92
Ogawa (1999)	79.35
Salcedo e Coelho (1999) (pior e média)	81.08 - 86.03

Perante o apresentado e tendo em conta o sentido de efectuar previsões conservativas, considerou-se que o pior cenário de dispersão proposto por Salcedo e Coelho (1999) conduz também ao pior cenário realista de comportamento do ciclone, tendo sido escolhido como modelo de previsão do coeficiente de dispersão por omissão.

4.4.4 Definição do volume de controlo e condições de amostragem

Considerando alguns dos elementos-chave do modelo PACyc (e correspondentes configurações), dá-se particular ênfase à definição do volume de controlo (se este é contínuo ou por outro lado discreto) e à amostragem da distribuição numérica de partículas (usando diâmetro de truncatura ou amostragem aleatória).

Todos os resultados apresentados foram obtidos usando o ciclone com a geometria proposta por Salcedo (2000), com um diâmetro interno de 447 mm, com uma velocidade média de entrada de $\approx 12\text{m/s}$ e com pressão absoluta de 1000 mbar e temperatura absoluta de 300 K.

Volume de controlo: contínuo vs. discreto

Em relação à forma geométrica do volume de controlo é possível afirmar que este tem uma geometria anular, uma vez que se encontra confinado entre o diâmetro externo do vórtice interno e o diâmetro do ciclone cilíndrico equivalente.

Levando em linha de conta a definição de volume de controlo contínuo, o modelo PACyc define-o como composto por uma fatia, com tempo de residência igual ao tempo de residência médio do gás e onde apenas ocorre remoção de partículas no final da fatia.

Nos casos onde o volume de controlo é definido como discreto, este começa por discretizar o volume de controlo contínuo num determinado número de fatias, cada uma destas com o mesmo tempo de residência, sendo este último igual ao tempo de residência

médio do gás no ciclone dividido pelo número de fatias. Uma consideração adicional é que para ambos os casos há emissão de partículas para a atmosfera entre dois passos consecutivos.

A Figura 4.11 mostra o impacto do número de fatias nas curvas de eficiência fraccional. Considerando o caso do volume de controlo contínuo (1 fatia), a curva de eficiência fraccional prevê valores similares às curvas dos casos com volumes de controlo discretos com fatias entre 20 e 30, sendo estes valores substancialmente superiores aos da linha de base. Considerando os casos com volumes de controlo entre 1 e 15 fatias, as curvas de eficiência fraccional aumentam conforme se aumenta o número de fatias. No entanto, a partir daí (de 15 a 100 fatias), as curvas de eficiência fraccional decrescem.

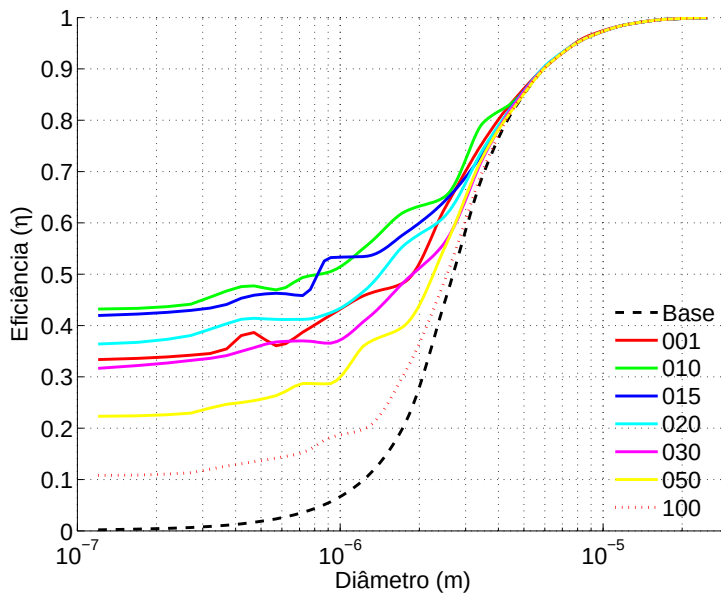


Figura 4.11 Análise de sensibilidade considerando o volume de controlo discreto - número de fatias

Na Tabela 4.8 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculada pelo PACyc para os casos apresentados na Figura 4.11.

Assim sendo, é possível concluir que este parâmetro tem um efeito misto nas curvas de eficiência fraccional, sendo possível explicar este fenómeno levando em linha de conta duas realidades opostas que o modelo PACyc conjuga na sua formulação.

No caso de 1 fatia (isto é, volume de controlo contínuo), não existe remoção de partículas ao longo do ciclone. Embora a maioria das partículas esteja permanentemente dentro do ciclone, isto não significa que estas estão sempre disponíveis para colisões

Tabela 4.8 Eficiências globais em função do número de fatias

Caso	Base (%)	PACyc (%)
1 fatia		87.06
10 fatias		87.92
15 fatias		87.65
20 fatias	81.08	86.47
30 fatias		86.47
50 fatias		84.67
100 fatias		83.65

dentro do volume de controlo, uma vez que o modelo considera que quando as partículas colidem com a parede do ciclone, deixam de estar disponíveis para aglomerar sendo-lhes atribuída uma probabilidade de colisão nula. Adicionalmente, ainda que esta realidade não tenha grande impacto para justificar o comportamento misto desta variável, é de referir que o modelo PACyc considera ainda o caso em que as partículas que se encontram dentro do vórtice interno do ciclone são perdidas, entre passos, na corrente de saída de gás.

No caso com várias fatias, no início de cada fatia as partículas são injectadas numa superfície anular, e conforme o tempo de interacção progride, o trajecto normal das partículas é comandado pelo vórtice exterior, isto é, em direcção à parede do ciclone, onde não ocorrerá mais aglomeração. No entanto, a fronteira que existe entre fatias tem a propriedade de reposicionar aleatoriamente as partículas, afastando-as da parede do ciclone, transformando partículas que estavam anteriormente indisponíveis para aglomerar na fatia anterior, em partículas novamente disponíveis para aglomerar na fatia actual. Assim sendo, o modelo PACyc considerando que existe uma mistura perfeita das partículas que transitam de uma fatia para a seguinte, permite que algumas partículas que rapidamente ficaram indisponíveis para aglomeração na fatia anterior, voltem a ficar disponíveis para aglomerar na fatia seguinte.

Conforme o número de fatias aumenta, as partículas estão progressivamente mais disponíveis para aglomerar, uma vez que estas estão a ser consecutivamente reinjectadas na superfície anular. No entanto, como existe remoção ao longo do ciclone (entre fatias), mais partículas vão sendo retiradas do ciclone.

Assim sendo, estas duas realidades (cada vez mais partículas disponíveis para aglomerar e cada vez mais partículas a serem capturadas e a escaparem ao ciclone) actuam

de forma oposta, justificando a existência de um número de fatias intermédio que levará a um valor máximo de eficiência fraccional que no caso apresentado, se situa entre 10 e 15 fatias. Conforme se aumenta o número de fatias (no caso para valores superiores a 30 fatias) são previstos valores de eficiência de captura cada vez mais próximos dos da linha de base.

Amostragem da distribuição numérica: diâmetro de truncatura vs. amostragem aleatória

Existem dois tipos de estratégias de amostragem da distribuição numérica implementados no modelo PACyc, de forma a gerar a distribuição de partículas a ser processada pelo modelo, isto é, injectadas no ciclone.

No caso da definição do diâmetro de truncatura, o modelo atribui uma partícula ao diâmetro de truncatura e o número de partículas para os diâmetros menores do que o diâmetro de truncatura são calculados obedecendo à proporção na distribuição numérica original. Para diâmetros maiores do que o diâmetro de truncatura, nenhuma partícula é inicialmente injectada.

Em alternativa, o modelo gera conjuntos de distribuições numéricas de uma forma aleatória, de forma a que estas sejam estatisticamente representativas da distribuição numérica de partículas original. Esta abordagem é referenciada como uma amostragem aleatória.

Comparando ambas as estratégias para o caso de estudo, um diâmetro de truncatura de $8\mu\text{m}$ corresponde a ≈ 20 k partículas, um diâmetro de truncatura de $12\mu\text{m}$ corresponde a ≈ 70 k partículas e um diâmetro de truncatura de $17\mu\text{m}$ corresponde a ≈ 120 k partículas.

As Figuras 4.12 e 4.13 mostram os resultados obtidos, tendo em conta que em ambos os casos se considerou um volume de controlo contínuo (1 fatia).

Na Tabela 4.9 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculado pelo PACyc para os casos apresentados na Figura 4.12.

A Figura 4.12 apresenta a influência do diâmetro de truncatura da distribuição inicial nas curvas de eficiência fraccional. Como já foi referido anteriormente, este parâmetro determina directamente o maior diâmetro inicialmente disponível para colisão e conforme este parâmetro aumenta, são obtidas maiores eficiências fraccionais para as partículas mais pequenas.

De uma forma empírica torna-se óbvio que escolher um diâmetro de truncatura pequeno desvia os resultados no sentido de haver menor aglomeração, uma vez que ou não há partículas maiores ou as que há são pouco representativas, sendo que essas

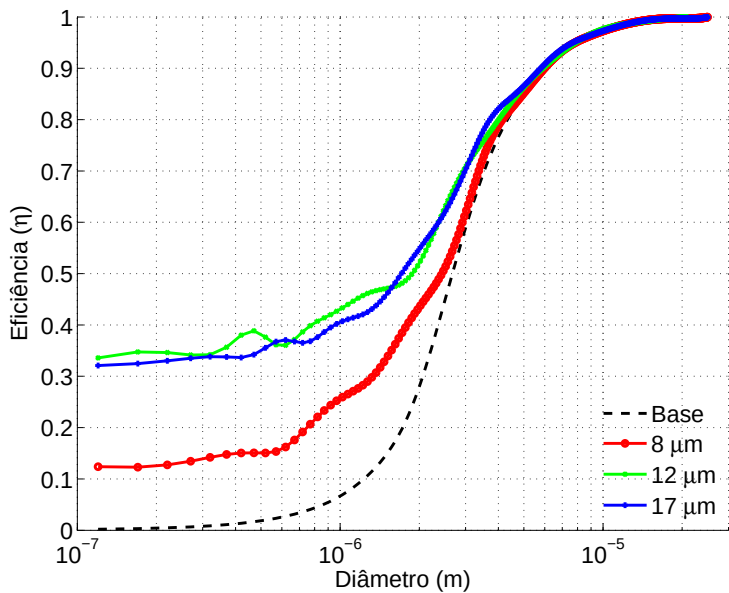


Figura 4.12 Análise de sensibilidade - diâmetro de truncatura (com volume de controle com 1 fatia)

Tabela 4.9 Eficiências globais em função do diâmetro de truncatura

Caso	Base (%)	PACyc (%)
8 μm		83.85
12 μm	81.08	85.73
17 μm		86.97

são os alvos preferenciais. Conforme se aumenta o diâmetro de truncatura, a presença de partículas maiores vai sendo cada vez maior, e injectando mais partículas maiores não só implica injectar mais partículas alvo, como também implica a injeção de mais partículas com eficiência de captura próximas de 100%, permitindo a captura mais eficaz de partículas pequenas que entretanto tenham aglomerado com as maiores.

Na Tabela 4.10 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculado pelo PACyc para os casos apresentados na Figura 4.13.

A Figura 4.13 apresenta os casos equivalentes aos apresentados na Figura 4.12, mas com uma amostragem aleatória. É possível constatar que este método prevê eficiências mais altas para as partículas pequenas do que para os casos correspondentes com diâmetro de truncatura. Apenas o caso de 12μm vs. 70k partículas apresenta quase a mesma

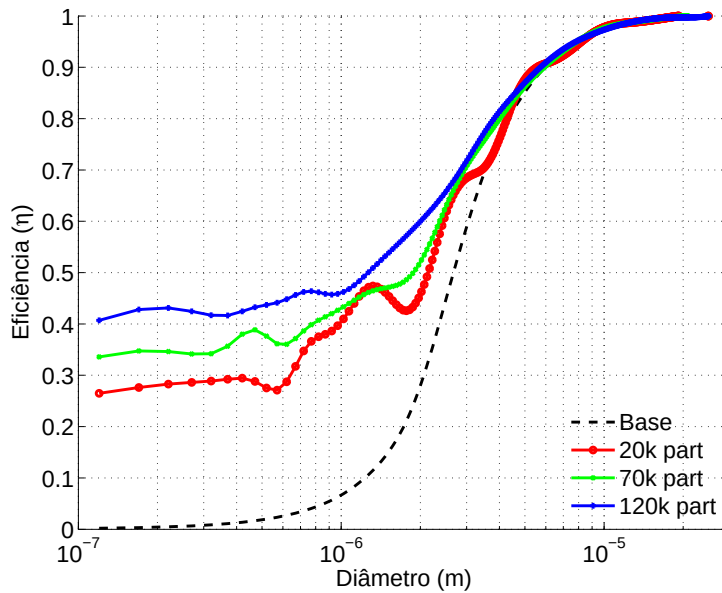


Figura 4.13 Análise de sensibilidade - amostragem aleatória

Tabela 4.10 Eficiências globais em função do número de partículas da amostragem aleatória

Caso	Base (%)	PACyc (%)
20 k		86.17
70 k	81.08	87.06
120 k		88.17

curva de eficiência fraccional, permitindo concluir que os sistemas são bem descritos ora por um diâmetro de truncatura grande ora por um número elevado de partículas amostradas.

Uma particularidade deste tipo de amostragem é que dever-se-á construir a curva de eficiência fraccional como uma média dos resultados de diversas amostragens, uma vez que para uma correcta amostragem aleatória, dever-se-ão simular vários casos com sementes geradoras de números pseudo-aleatórios diferentes. Este tipo de estratégia acarreta por isso aumentos significativos do poder computacional necessário.

4.4.5 Estudo de sensibilidade paramétrica do modelo de aglomeração

Nesta secção são apresentados os resultados do estudo de sensibilidade paramétrica feito aos parâmetros específicos do modelo de aglomeração integrado no modelo PACyc.

No sentido de ser possível fazer uma comparação directa entre resultados, todos foram obtidos com a geometria Hurricane[®], com um diâmetro interno de 447 mm, com uma velocidade média de entrada de $\approx 12\text{m/s}$ e com pressão absoluta de 1000 mbar e temperatura absoluta de 300 K.

Além disso, a distribuição de tamanho de partículas processada é a apresentada na Figura 4.9(b), o método de injeção foi a amostragem aleatória com 70 k partículas (equivalente a um diâmetro de truncatura de $12\text{ }\mu\text{m}$) e a estas corresponde uma massa volúmica de 1500 kg/m^3 e uma concentração à entrada de 1 g/m^3 .

Valores das constantes a e b (propostos por Löffler (1988))

Löffler (1988) propõe que a e b (presentes na equação 3.63) para números de Reynolds de partícula inferiores a 1, tomem os valores de 0.65 e 3.7 respectivamente.

No entanto, de forma a testar o impacto da variação destes parâmetros nos resultados finais, foram construídos 6 casos de estudo, conforme o apresentado na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 Combinações usadas no estudo de sensibilidade aos parâmetros a e b propostos por Löffler (1988)

Caso	Descrição do caso	a	b
1	Variação de a (metade)	0.325	3.70
2	Variação de a (dobro)	1.300	3.70
3	Variação de b (metade)	0.650	1.85
4	Variação de b (dobro)	0.650	7.40
5	Variação de a e b (metade)	0.325	1.85
6	Variação de a e b (dobro)	1.300	7.40

Com estes casos pretende-se mostrar o impacto que cada um dos parâmetros tem isoladamente assim como o impacto da sua acção conjunta nos resultados finais.

A Figura 4.14 evidencia as curvas de eficiência fraccional em função dos casos apresentados na Tabela 4.11.

Na Tabela 4.12 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculada pelo PACyc para os casos apresentados nas Figuras 4.14(a), 4.14(b) e 4.14(c).

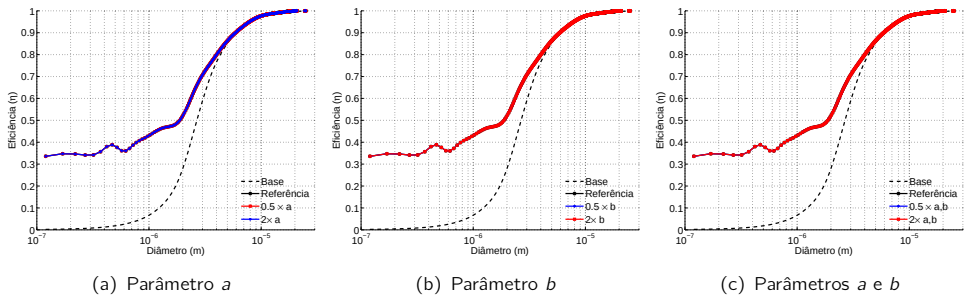


Figura 4.14 Análise de sensibilidade ao modelo de aglomeração - parâmetros a e b propostos por Löffler (1988)

Tabela 4.12 Eficiências globais em função dos parâmetros a e b

Caso	Base (%)	PACyc (%)
Todos	81.08	87.06

É possível constatar que quer o parâmetro a (Figura 4.14(a)) quer o parâmetro b (Figura 4.14(b)) a variar isoladamente não têm qualquer tipo de impacto no resultado final do modelo PACyc. Combinando os parâmetros (Figura 4.14(c)), a conclusão mantém-se, sendo possível de afirmar que o resultado do modelo é insensível à variação do valor das constantes a e b .

Isto ocorre uma vez que estas constantes têm apenas impacto no cálculo da eficiência de colisão quando se considera a aglomeração por intersecção e impacto inercial. Analisando a equação 3.63, se considerarmos valores razoáveis para cada uma das variáveis da equação 3.62 ($\rho_p = 1000\text{kg/m}^3$, $|\vec{u}_{p1} - \vec{u}_{p2}| = 1\text{m/s}$, $d_p = 0.26\mu\text{m}$, $D_k = 5\mu\text{m}$, $\mu = 1.85 \times 10^{-5}\text{kg/ms}$), chega-se à conclusão que para os casos estudados os valores de eficiência de colisão são sempre inferiores a 2%, implicando que o modelo considera que as partículas muito pequenas só aglomeram (por este mecanismo) com as partículas grandes quando estas estão perfeitamente alinhadas, uma vez que a “janela” de colisão é muito pequena.

Nos casos em que as partículas têm tamanhos semelhantes, a eficiência de colisão por intersecção e impacto inercial tende para valores próximos de 1, prevendo que estas partículas entre elas tenham “janelas” de colisão maiores.

Mas o facto que justifica realmente a insensibilidade do modelo a estes parâmetros, neste caso, passa pela consideração das colisões devido à dispersão turbulenta, que tem um comportamento complementar ao mecanismo de intersecção e impacto inercial na

zona em que este prevê valores baixos da eficiência de colisão. Nos mesmos casos e usando as equações 3.64 e 3.65 chega-se à conclusão que devido aos efeitos da dispersão turbulenta, a eficiência de colisão tende sempre para 1, o que faz com que a e b não tenham impacto na curva de eficiência fraccional.

Coefficiente de restituição energética após colisão

O modelo de Sommerfeld e Ho (2003) propõe como parâmetro o coeficiente de restituição energética após colisão. Este parâmetro está presente nas equações 3.71, 3.76 e 3.77 e permite definir a quantidade de energia que permanece na partículas após colisão.

Considerando os casos extremos, quando este parâmetro toma o valor de 0, as partículas colidem e ficam sem energia cinética, sendo esta dissipada sob outras formas, como por exemplo calor. Quanto tal acontece, a colisão é 100% inelástica, o que leva a que cada colisão resulte sempre na formação de um aglomerado.

Considerando o outro extremo, quando este parâmetro toma o valor de 1, as partículas mantêm a sua energia cinética na íntegra, originando colisões 100% elásticas, o que se significa que nenhuma colisão resultaria em aglomeração.

Analisando o caso particular da equação 3.71, quando o parâmetro tende para 0, o valor da velocidade crítica tende para $+\infty$, o que implica (pela relação 3.72) que todas as partículas que colidem, de facto aglomeram.

Neste caso, e considerando as equações 3.76 e 3.77, é possível constatar que as partículas injectadas ficam com velocidade relativa (em relação à partícula alvo) igual a 0, quando o parâmetro é 0, o que traduz que as partículas ficam juntas, viajando à mesma velocidade.

No caso em que o parâmetro tende para 1, o valor da velocidade crítica tende para 0, o que implica (pela relação 3.72) que nenhuma das partículas que colidem, de facto aglomera.

Olhando para as equações 3.76 e 3.77, é possível constatar que as partículas injectadas ficam com a norma da velocidade relativa (em relação à partícula alvo) igual à que tinham antes de colisão, quando o parâmetro é 1, o que traduz uma colisão 100% elástica.

Tendo em conta as explicações feitas, a Figura 4.15 evidencia as curvas de eficiência fraccional conforme se varia o valor do coeficiente de restituição energética. No caso de referência, o valor adoptado por este parâmetro é 0.4, tendo sido feitos dois casos em que se varia apenas este parâmetro: um caso com metade do valor do caso de referência, e outro 50% acima do caso de referência.

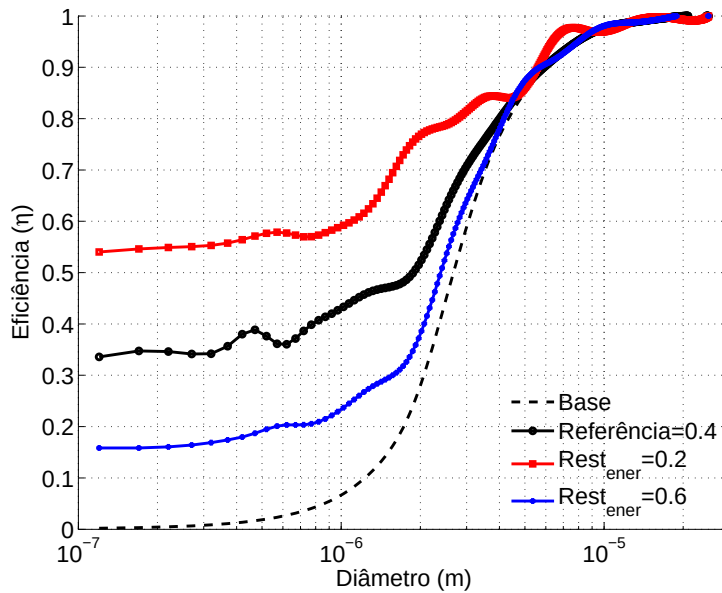


Figura 4.15 Análise de sensibilidade ao modelo de aglomeração - coeficiente de restituição energética

Na Tabela 4.13 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculadas pelo PACyc para os casos apresentados na Figura 4.15.

Tabela 4.13 Eficiências globais em função do coeficiente de restituição energética

Caso	Base (%)	PACyc (%)
Ref = 0.4		87.06
Rest. Ener = 0.2	81.08	91.31
Rest. Ener = 0.6		83.90

É possível constatar que os resultados vão de encontro ao previsto após a análise das equações onde este parâmetro tem influência.

Analizando o impacto deste parâmetro nas curvas de eficiência fraccional, é expectável que quando este parâmetro tome o valor 1, que se obtenha a linha de base proposta por Mothes e Löffler (1988), e que quando este parâmetro tome o valor 0, que a curva de eficiência fraccional seja uma linha horizontal com valor de eficiência de captura muito perto de 100%, uma vez que todas as partículas aglomerariam e ficariam com um diâmetro suficiente para que fossem todas capturadas. As únicas excepções seriam as

partículas que escapam ao ciclone, impedindo este facto de se obter uma linha horizontal a 100% de captura para as partículas de todos os diâmetros.

Distância de contacto interparticular

Este parâmetro foi introduzido por Hiller (1981) e tem influência apenas na equação 3.71.

Com este parâmetro pretende-se definir a distância a que as partículas estão uma da outra, para que o mecanismo de adesão por forças de van der Waals seja o dominante.

Quanto menor a distância de contacto para considerar que as partículas estão aglomeradas, maior é a velocidade crítica e à semelhança do parâmetro de restituição energética, quanto maior é a velocidade crítica, mais partículas que colidem têm condições para aglomerar.

A Figura 4.16 evidencia as curvas de eficiência fraccional conforme se varia a distância de contacto entre as partículas para se considerar que são mantidas juntas pela acção das forças de van der Waals.

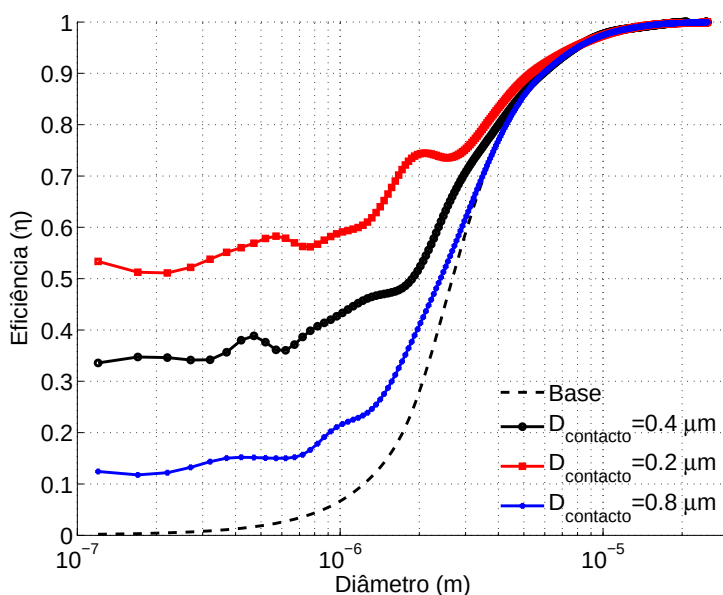


Figura 4.16 Análise de sensibilidade ao modelo de aglomeração - distância de contacto

Na Tabela 4.14 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculadas pelo PACyc para os casos apresentados na Figura 4.16.

Tabela 4.14 Eficiências globais em função da distância de contacto

Caso	Base (%)	PACyc (%)
Ref = 0.4 μm		87.06
$D_{\text{contacto}} = 0.2 \mu\text{m}$	81.08	90.54
$D_{\text{contacto}} = 0.8 \mu\text{m}$		83.35

Quanto menor a distância a que as partículas estão para se considerarem aglomeradas devido às forças de van der Waals, maior é a captura prevista pelo modelo PACyc, estando estes resultados em conformidade com o contextualizado acima.

Pressão de contacto interparticular

À semelhança dos outros parâmetros relevantes para o modelo de aglomeração, a pressão de contacto entre as partículas tem apenas impacto na equação 3.71, onde se define a velocidade crítica para ocorrer aglomeração.

Analizando em detalhe a equação 3.71, quanto maior a pressão de contacto entre as partículas, menor a velocidade crítica para ocorrer colisão, o que implica menor aglomeração, sendo que na Figura 4.17 se evidenciam as curvas de eficiência fraccional conforme se varia a pressão de contacto.

Na Tabela 4.15 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculadas pelo PACyc para os casos apresentados na Figura 4.17.

Os resultados da Figura 4.17 estão de acordo com o expectável, tendo-se optado pelo valor de Sommerfeld e Ho (2003) como valor de referência para este trabalho.

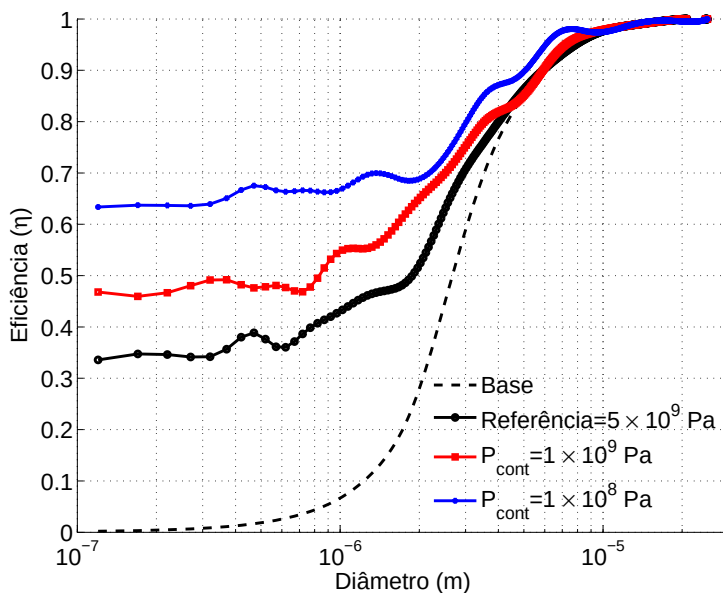


Figura 4.17 Análise de sensibilidade ao modelo de aglomeração - pressão de contacto

Tabela 4.15 Eficiências globais em função da pressão limite de contacto

Caso	Base (%)	PACyc (%)
Ref = 5×10^9 Pa		87.06
$P_{cont} = 1 \times 10^9$ Pa	81.08	89.23
$P_{cont} = 1 \times 10^8$ Pa		92.18

Combinação dos parâmetros apresentados

Seguindo a estrutura de ensaios desenvolvidos por Gronald e Staudinger (2006), a Tabela 4.16 apresenta os três casos de estudo levados a cabo nesse trabalho. Estas condições de simulação foram obtidas através da combinação dos três parâmetros anteriormente apresentados isoladamente.

A Figura 4.18 evidencia as curvas de eficiência fraccional em função dos casos de estudo apresentados anteriormente.

Na Tabela 4.17 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculadas pelo PACyc para os casos apresentados na Figura 4.18.

Como foi observado anteriormente nos casos de estudo isolados, é possível constatar que todos estes parâmetros têm impacto directo no valor da velocidade crítica de

Tabela 4.16 Combinações usadas no estudo desenvolvido por Gronald e Staudinger (2006)

Definição	Variável	Unidade	Caso 1	Caso 2	Referência
Coeficiente de restituição	e_{pl}	—	0.8	0.8	0.4
Pressão de contacto	p_{pl}	Pa	$1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^9$
Distância de contacto	z_0	m	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$
Velocidade crítica (equação 3.71)	$v_{cr,1\mu m}$	m/s	0.146	0.463	0.625

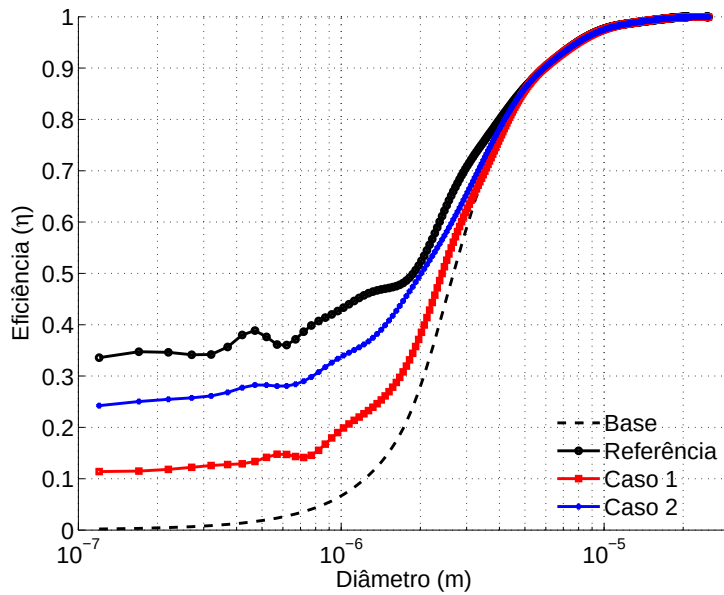


Figura 4.18 Análise de sensibilidade ao modelo de aglomeração - Casos estudo de Gronald e Staudinger (2006)

Tabela 4.17 Eficiências globais em função dos valores dos parâmetros usados por Gronald e Staudinger (2006)

Caso	Base (%)	PACyc (%)
Ref		87.06
Caso 1	81.08	83.11
Caso 2		85.47

aglomeração, sendo que esta apresenta um valor incremental entre os casos 1, 2 e o caso de referência, considerando como exemplo o caso particular de uma partícula de 1 μm ser partícula-alvo.

Assim sendo, os resultados apresentados na Figura estão de acordo com o espectável, uma vez que quanto maior a velocidade crítica, maior a aglomeração, e quanto maior a aglomeração, maior o aumento da eficiência de captura das partículas mais pequenas. É possível constatar que o caso de referência é o caso que conduz a resultados de eficiência de captura mais elevada, em relação aos casos de Gronald e Staudinger (2006), deixando em aberto qual a configuração que melhor representa a realidade: os valores de Sommerfeld e Ho (2003) ou de Gronald e Staudinger (2006). Neste trabalho optou-se por usar os valores de Sommerfeld e Ho (2003).

4.4.6 Estudo de sensibilidade paramétrica do modelo PACyc

Nesta secção são apresentados os resultados do estudo de sensibilidade paramétrica ao modelo PACyc, aplicado ao caso de um ciclone em funcionamento isolado e à semelhança do estudo de sensibilidade paramétrica do modelo de aglomeração, todos os resultados foram obtidos usando o ciclone Hurricane[®], com um diâmetro interno de 447 mm, com uma velocidade média de entrada de $\approx 12\text{m/s}$ e com pressão absoluta de 1000 mbar e temperatura absoluta de 300 K e com a distribuição de tamanho de partículas apresentada na Figura 4.9(b).

Como referência para todos os casos nesta secção, os parâmetros para o caso base tomam os seguintes valores: tempo de interacção ($1\tau = 0.7\text{s}$), massa volúmica (1500 kg/m^3) e concentração (1 g/m^3). O método de amostragem usado foi a amostragem aleatória de 70k partículas (o que equivale a um diâmetro de truncatura de $12\text{ }\mu\text{m}$) e o volume de controlo foi considerado contínuo (1 fatia).

Tempo de interacção

A Figura 4.19 apresenta o impacto do tempo de interacção nas curvas de eficiência fraccional considerando a aglomeração dentro do ciclone.

Na Tabela 4.18 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculadas pelo PACyc para os casos apresentados na Figura 4.19.

Analisando a Figura 4.19, este parâmetro tem um comportamento assíptótico, isto é, conforme o tempo aumenta, os resultados da eficiência fraccional tendem para um patamar, que no caso é o valor para o tempo de passagem igual ao tempo de residência médio do gás no ciclone. Isto acontece uma vez que as partículas atingem a parede do ciclone antes de se atingir o tempo de residência do gás no ciclone ($t < 1.0\tau$), ficando a partir dessa altura indisponíveis para aglomerar.

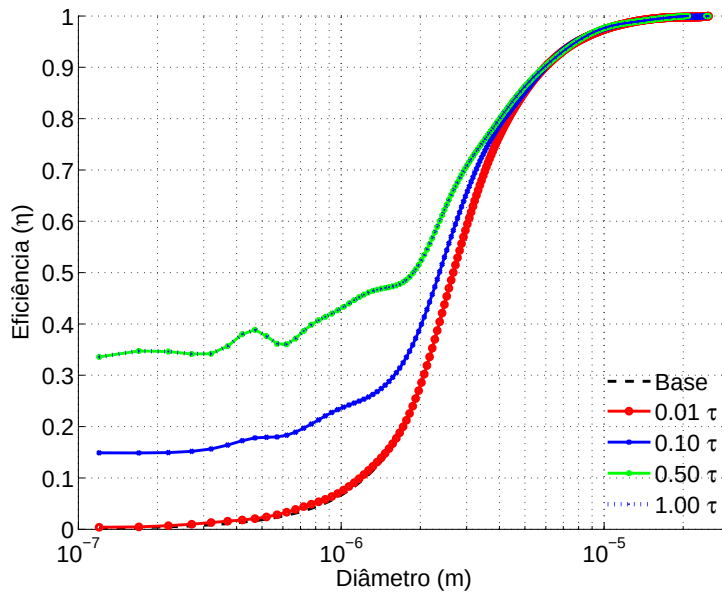


Figura 4.19 Análise de sensibilidade ao modelo PACyc - tempo de interação

Tabela 4.18 Eficiências globais em função dos valores do tempo de interação

Caso	Base (%)	PACyc (%)
0.01 τ	81.08	81.25
0.10 τ		83.81
0.50 τ		87.06
1.00 τ		87.06

Antes do momento em que todas as partículas já atingiram as paredes do ciclone, é possível observar que conforme o tempo de residência/aglomeração aumenta, as eficiências fracionais das partículas mais pequenas aumentam também. Após todas as partículas colidirem com a parede (neste caso $t \geq 0.5\tau$), a curva de eficiência fracional é igual independentemente do tempo de residência.

Massa volúmica

A Figura 4.20 apresenta as curvas de eficiência fracional sem aglomeração em função da massa volúmica e as correspondentes curvas após aglomeração

Na Tabela 4.19 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculadas pelo

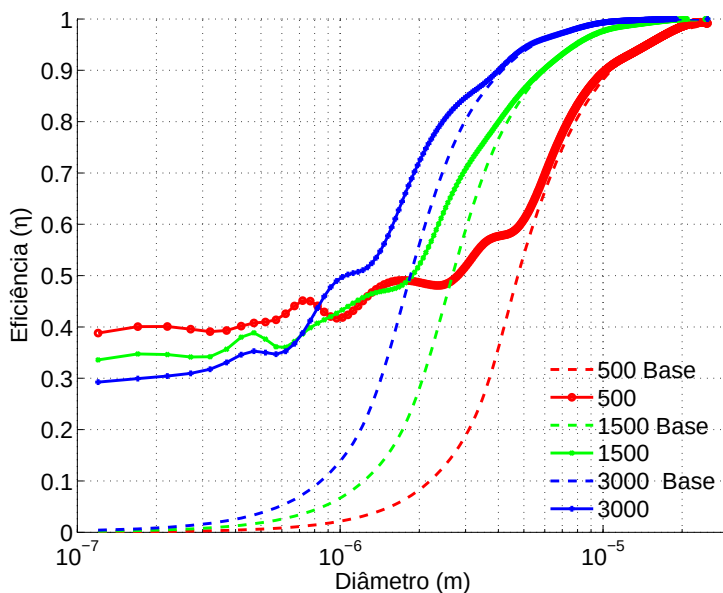


Figura 4.20 Análise de sensibilidade ao modelo PACyc - massa volúmica

PACyc para os casos apresentados na Figura 4.20.

Tabela 4.19 Eficiências globais em função dos valores da massa volúmica

Caso	Base (%)	PACyc (%)
500 kg/m ³	71.10	81.19
1500 kg/m ³	81.08	87.06
3000 kg/m ³	85.80	90.10

Este caso é particular, uma vez que as eficiências base (propostas por Mothes e Löffler (1988)) são diferentes em função da massa volúmica das partículas. Estas prevêm que conforme a massa volúmica das partículas aumenta, a sua eficiência de captura aumenta também, o que implica que as curvas de eficiência fraccional previstas aumentam conforme a massa volúmica aumenta, estando este facto de acordo com o esperado.

Focando o fenómeno da aglomeração, o modelo PACyc leva a maiores eficiências de captura devido ao comportamento das linhas de base sem aglomeração. Além disso, para menores massas volúmicas, o aumento da eficiência devido a aglomeração torna-se mais importante, sobretudo para as partículas menores.

Analisando a equação 3.71 em relação à massa volúmica das partículas, é possí-

vel observar que quanto menor esta é, maior é a velocidade crítica de aglomeração, favorecendo a aglomeração.

Assim sendo, em casos particulares é possível que o facto da linha de base prejudicar a eficiência de captura de partículas menos densas seja compensado pelo correspondente favorecimento da aglomeração.

Concentração

A Figura 4.21 evidencia as curvas de eficiência fraccional conforme a concentração varia mais ou menos uma ordem de grandeza em torno do caso de referência.

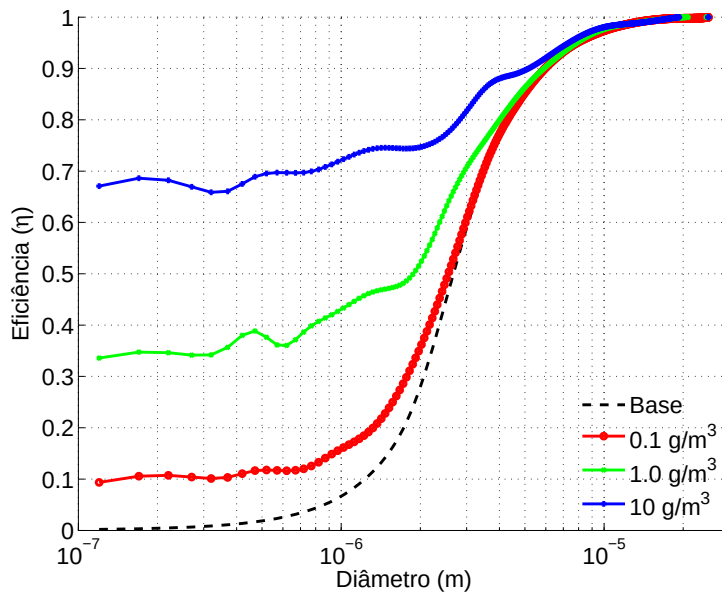


Figura 4.21 Análise de sensibilidade ao modelo PACyc - concentração

Na Tabela 4.20 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculadas pelo PACyc para os casos apresentados na Figura 4.21.

Tabela 4.20 Eficiências globais em função dos valores da concentração

Caso	Base (%)	PACyc (%)
0.1 g/m ³		82.93
1.0 g/m ³	81.08	87.06
10.0 g/m ³		92.66

A Figura 4.21 permite mostrar que mesmo para casos com concentrações muito baixas (100 mg/m^3) o modelo consegue prever eficiências de captura maiores do que o previsto por Mothes e Löffler (1988). Este tem particular relevância uma vez que a muito baixas concentrações a colisão e aglomeração de partículas são fenômenos que, mesmo ocorrendo a muito menor escala (devido em parte ao pequeno número de partículas no volume de controlo) conseguem justificar aumentos da eficiência de captura das partículas mais pequenas e o modelo PACyc consegue prever esses aumentos de eficiência.

Considerando o outro extremo, nos casos de elevada concentração, este modelo consegue prever eficiências muito elevadas, sem que para isso recorra à consideração como no modelo de Muschelknautz (Hoffman e Stein, 2002; Muschelknautz e Krambrock, 1970; Muschelknautz e Trefz, 1990, 1991), isto é, que em situações em que a concentração seja superior a uma concentração crítica, parte das partículas são capturadas não classificadas, introduzindo por isso uma descontinuidade nas previsões de diversos casos.

Coefficiente de fricção interparticular

A Figura 4.22 evidencia as curvas de eficiência fraccional conforme se varia o coeficiente de fricção entre as partículas.

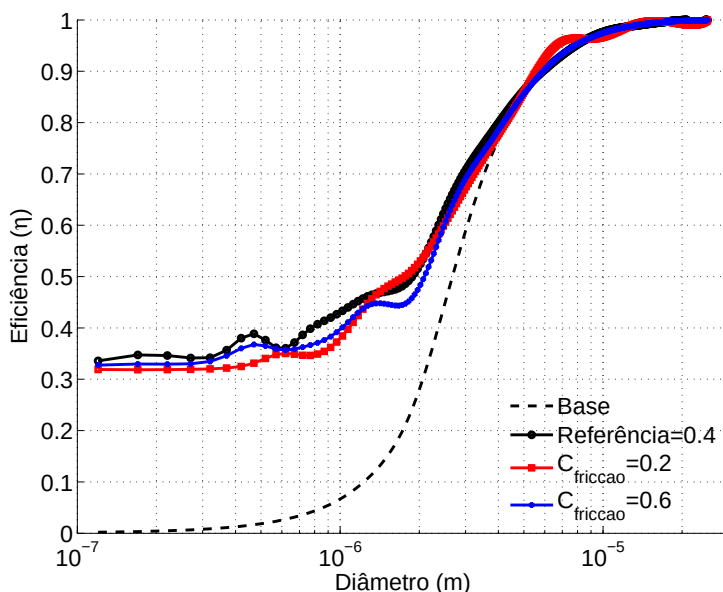


Figura 4.22 Análise de sensibilidade ao modelo PACyc - coeficiente de fricção interparticular

Na Tabela 4.21 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculadas pelo PACyc para os casos apresentados na Figura 4.22.

Tabela 4.21 Eficiências globais em função dos valores do coeficiente de fricção interparticular

Caso	Base (%)	PACyc (%)
Ref=0.4		87.06
Coef _{friccao} =0.2	81.08	86.68
Coef _{friccao} =0.6		86.52

Sendo este um parâmetro com impacto essencialmente a uma escala molecular, torna-se evidente que este não tem grande evidência nos resultados do modelo PACyc, obtendo resultados semelhantes entre os vários casos simulados.

Passo de integração

A Figura 4.23 evidencia as curvas de eficiência fraccional conforme se varia o passo de integração.

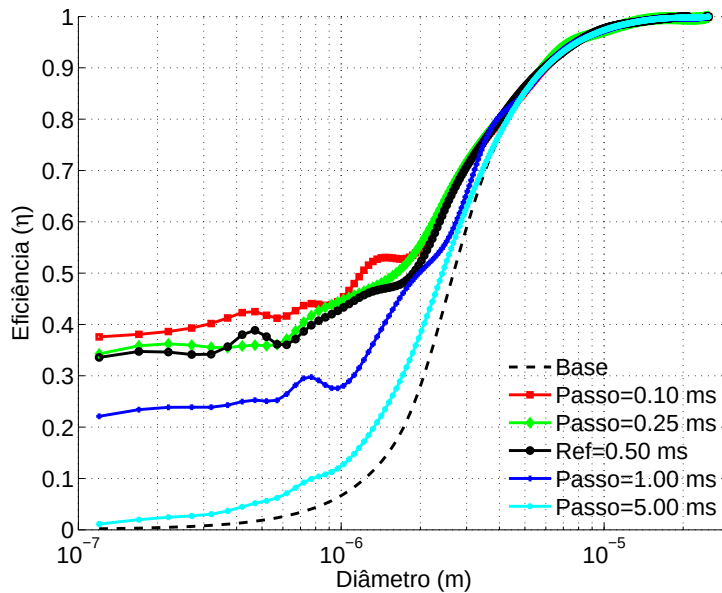


Figura 4.23 Análise de sensibilidade ao modelo PACyc - passo de integração

Na Tabela 4.22 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculadas pelo

PACyc para os casos apresentados na Figura 4.23.

Tabela 4.22 Eficiências globais em função dos valores do passo de integração

Caso	Base (%)	PACyc (%)
Passo=0.10 ms		87.73
Passo=0.25 ms		87.40
Ref=0.50 ms	81.08	87.06
Passo=1.00 ms		85.28
Passo=5.00ms		82.39

Sendo esta uma variável particularmente relevante na análise das colisões, assim como na performance do processo de simulação, foi feita uma análise para definir qual o domínio de valores do passo que fazem com que por um lado não se entre na escala de turbulência a nível molecular (o que aconteceria se o passo fosse demasiado pequeno) e por outro lado se perdesse a turbulência à macro-escala a que as partículas estão sujeitas (o que aconteceria se o passo fosse demasiado grande). Assim, chegou-se à conclusão que o passo deveria situar-se entre 0.25 ms e 1.0ms.

Tendo presente que o passo define simultaneamente as vezes que se analisam as trajectórias/colisões/aglomerações/escape das partículas no vórtice central, era expectável que esta variável tivesse um elevado impacto nos resultados finais do modelo PACyc.

No entanto, com a escolha de passo dentro do intervalo correcto para as escalas de turbulência que ocorrem dentro do ciclone, tal como proposto por Ho e Sommerfeld (2005), conseguiu-se obter resultados semelhantes entre os vários casos. Assim, a escolha do passo levou em linha de conta, acima de tudo o binómio tempo de processamento e a capacidade de fazer previsões de performance de uma forma conservativa, tendo-se optado por um passo de 0.5ms.

No sentido de verificar o impacto de uma escolha errada do passo de integração e mostrar a não validade destes casos simulados, apresentam-se ainda os resultados de uma simulação com passo 0.1ms e outra com um passo de 5ms, sendo possível observar que quando o passo é demasiado pequeno (0.1ms) é feita uma análise com uma frequência elevada das aglomerações e as partículas colidem com maior frequência, aumentando as curvas de eficiência fraccional.

Quando o passo é demasiado grande (5ms), a análise das colisões é demasiado esparsa, perdendo-se colisões que ocorreriam caso fosse feita uma análise mais frequente, originando curvas de eficiência cada vez mais próximas da linha de base proposta por Mothes e Löffler (1988).

Factor multiplicativo

A Figura 4.24 evidencia as curvas de eficiência fraccional conforme a factor multiplicativo aumenta.

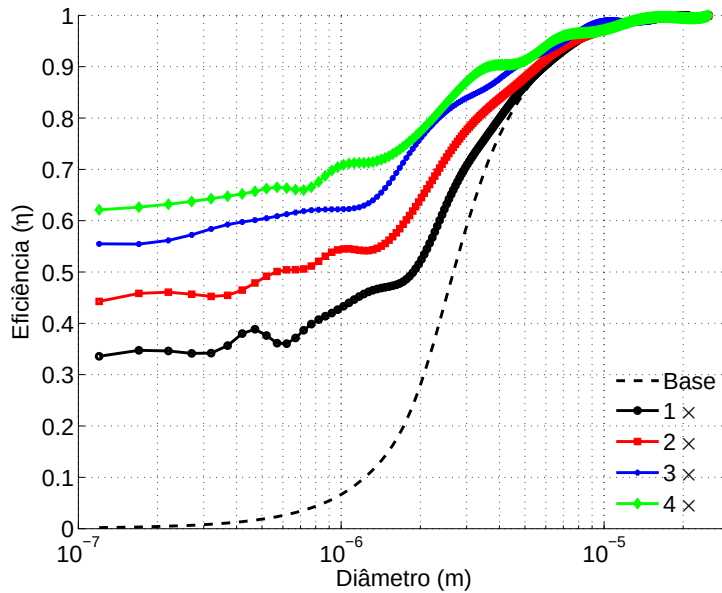


Figura 4.24 Análise de sensibilidade ao modelo PACyc - factor multiplicativo

Na Tabela 4.23 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculadas pelo PACyc para os casos apresentados na Figura 4.24.

Tabela 4.23 Eficiências globais em função dos valores do factor multiplicativo

Caso	Base (%)	PACyc (%)
1 ×	81.08	87.06
2 ×		89.41
3 ×		91.95
4 ×		93.09

É possível concluir que com o aumento deste parâmetro, as eficiências fraccionais aumentam. Isso justifica-se pelo facto de existirem muito mais partículas alvo com eficiências de captura elevada, assim como muitas partículas injectadas de diâmetro

pequenos. Isto acontece mesmo mantendo o rácio das partículas entre elas e do volume total destas e o volume de controlo.

Considerando que há mais partículas para as mesmas condições limite, as partículas demoram mais tempo a colidirem todas com a parede do ciclone ou a escaparem pela vórtice central, estando por isso mais tempo disponíveis para aglomerar.

Este parâmetro conduz a previsões de resultados de captura do ciclone por excesso, sendo usado por omissão o valor de $1\times$.

Número de sub-fatias

A Figura 4.25 evidencia as curvas de eficiência fraccional conforme o número de sub-fatias aumenta.

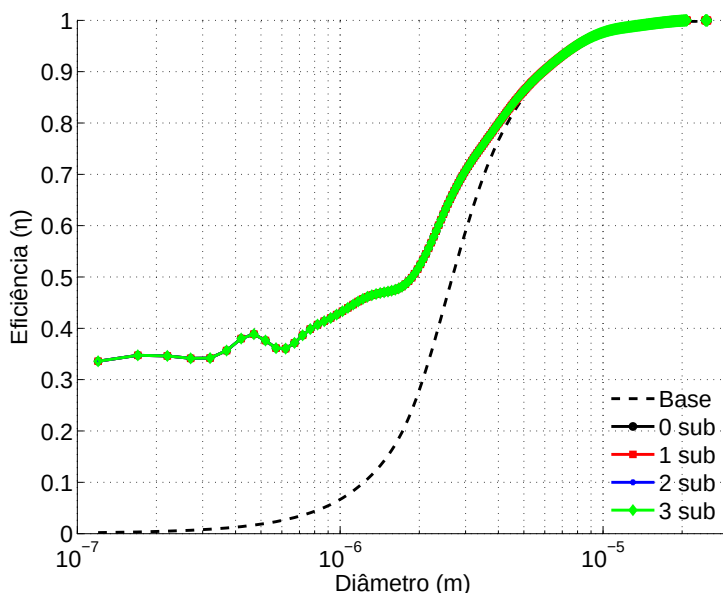


Figura 4.25 Análise de sensibilidade ao modelo PACyc - número de sub-fatias razoáveis

Em função dos resultados apresentados, o modelo revela-se insensível ao número de sub-fatias, sendo que este caso particular (e na grande maioria dos casos), este facto é justificável pela percentagem de tempo efectivo de colisão dentro do ciclone (aproximadamente 3% do tempo de residência médio do gás no ciclone) ser muito reduzido. Isto quer dizer que ao final de 3% do tempo de residência médio do gás no ciclone as partículas ou já escaparam pelo vórtice central ou já colidiram com a parede do ciclone.

Considerando o caso com 4 sub-fatias, o tempo de contacto em cada sub-fatia seria de 25% do tempo de residência médio do gás no ciclone. Como as partículas estão todas fora do volume de controlo antes desse tempo, as partículas saem da fatia sem passarem pela sub-fatia.

Em casos com tempos por fatia maiores, é expectável que conforme o número de fatias aumente, as curvas de eficiência fraccional diminuam. Isso pode ser observado no caso apresentado na Figura 4.26, ainda que isto seja obtido com valores de sub-fatias não razoáveis.

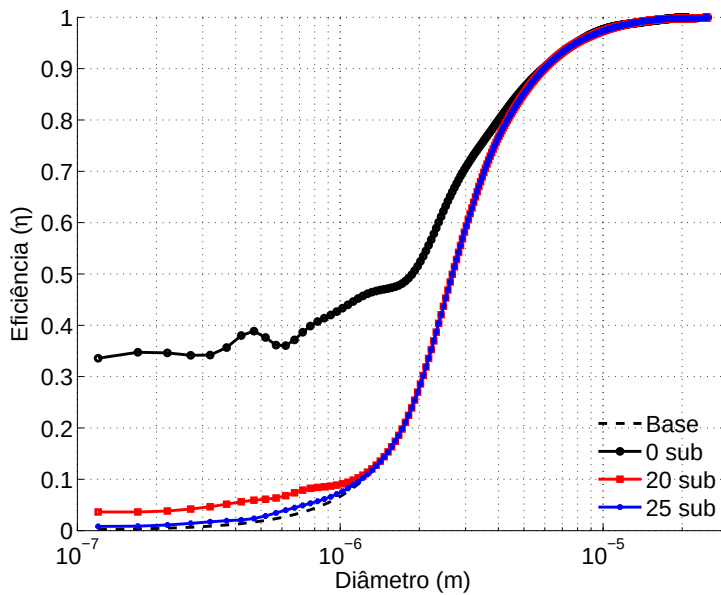


Figura 4.26 Análise de sensibilidade ao modelo PACyc - número de sub-fatias limite

Na Tabela 4.24 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculadas pelo PACyc para os casos apresentados na Figuras 4.25 e 4.26.

Tabela 4.24 Eficiências globais em função do número de sub-fatias

Caso	Base (%)	PACyc (%)
0 sub-fatias		87.06
1 sub-fatias		87.06
2 sub-fatias	81.08	87.06
3 sub-fatias		87.06
20 sub-fatias		81.38
25 sub-fatias		81.16

Número de corridas

A Figura 4.27 evidencia as curvas de eficiência fraccional de várias corridas com sementes para geração de números aleatórios diferentes.

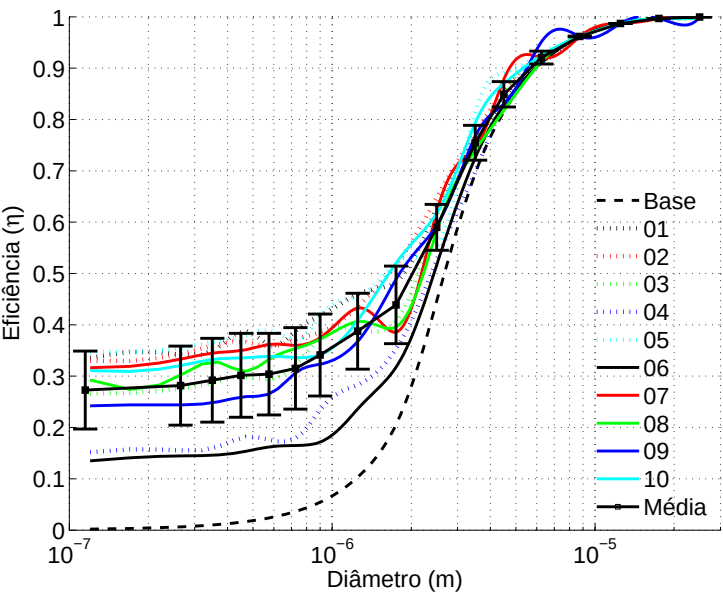


Figura 4.27 Análise de sensibilidade ao modelo PACyc com 70k partículas - número de corridas

É possível constatar que o caso médio representa bem todas as simulações, uma vez que nenhuma das simulações obtidas tem um comportamento substancialmente diferente.

Para um número mais elevado de partículas amostradas, o intervalo de confiança

mantém-se conforme se pode observar na Figura 4.28, sendo possível concluir que a performance em função do número de corridas é reprodutível.

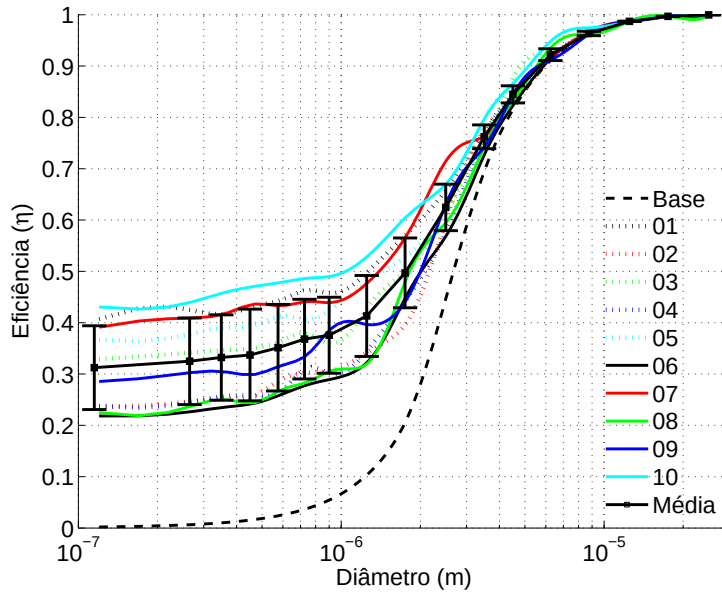


Figura 4.28 Análise de sensibilidade ao modelo PACyc com 120k partículas - número de corridas

Na Tabela 4.25 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculadas pelo PACyc para os casos apresentados nas Figuras 4.27 e 4.28.

Tabela 4.25 Eficiências globais em função da corrida e de número de partículas amostrado

Caso	Base (%)	PACyc (%)	
		70k	120k
Corrida 1		87.07	88.20
Corrida 2		87.32	85.58
Corrida 3		86.01	86.99
Corrida 4		83.81	85.54
Corrida 5		87.39	87.73
Corrida 6	81.08	83.40	85.07
Corrida 7		86.69	88.29
Corrida 8		85.94	85.64
Corrida 9		86.18	86.32
Corrida 10		87.00	89.23
Média $\pm$ i.c. 95%		86.1 $\pm$ 1.4	86.9 $\pm$ 1.4

4.5 Modelo PACyc integrando Recirculação Mecânica e Electrostática

Nesta secção é apresentada a integração do modelo de recirculação mecânica e electrostática no modelo PACyc. Começa-se por aplicar o conceito de linha de base a estes casos, apresentando em seguida, a título de exemplo, o impacto da recirculação mecânica e da recirculação electrostática nos resultados do modelo. Por fim são apresentados os resultados do estudo de sensibilidade paramétrica com impacto específico quando o sistema estudado é composto pelo sistema com recirculação (sem e com campo eléctrico no recirculador).

Esta secção apresenta uma das principais razões que levaram ao desenvolvimento do modelo PACyc, uma vez que este tem não só o objectivo de estudar o impacto da aglomeração na captura do ciclones, mas também a integração dos vários fenómenos que ocorrem no sistema Hurricane[®], ReCyclone[®] MH e ReCyclone[®] EH.

Constatou-se que as variáveis estudadas na secção correspondente ao modelo PACyc para o caso do Hurricane[®] têm o mesmo impacto quando o sistema opera com recirculação.

Um conceito comum a todos os casos é o facto do modelo PACyc, de forma a integrar os fenómenos de recirculação, construir diferentes linhas de base em função das

fenómenos levados em linha de conta.

A eficiência de base é prevista pelo modelo de Mothes e Löffler (1988) para o caso do ciclone isolado, Salcedo et al. (2007) para o caso do ciclone com recirculação mecânica e Salcedo et al. (2007) acoplado com o modelo de previsão electrostática baseado nos princípios enunciados por White (1963), Oglesby (1978) e Parker (1997) para o caso com recirculação electrostática.

4.5.1 Linhas de base sem aglomeração

À semelhança do evidenciado na Tabela 4.6, um dos passos por trás do estudo de aglomeração passa pela previsão das eficiências de captura das partículas sem aglomeração. Estes valores são referidos como *linha de base*.

Considerando o exemplo apresentado para o caso do ciclone isolado, foram construídas as linhas de base para o caso com ciclone com recirculação.

No caso apenas com recirculação mecânica, é necessário especificar a fracção de recirculação que se considera. No sentido de simular condições próximas das possíveis a obter na realidade, neste caso de estudo a fracção de recirculação foi definida como 40% do caudal total que entra no ciclone. Os resultados desta simulação são apresentados na Figura 4.29 na série a vermelho, e serão discutidos adiante.

No caso com recirculação electrostática, são necessários dados específicos com impacto apenas no caso com campo eléctrico. Assim sendo, é necessário especificar uma estimativa da área específica do pó (com impacto na supressão da corrente, conforme a equação 2.87), comprimento e diâmetro do eléctrodo, potencial aplicado, a humidade atmosférica (com impacto no potencial que induz faísca, conforme a equação 2.78) e a mobilidade iónica (com impacto na intensidade de corrente obtida dentro do recirculador). Nos casos apresentados, estes parâmetros tomam os valores apresentados na Tabela 4.26.

Levando em consideração os valores apresentados, há ainda que levar em linha de conta para o caso da recirculação electrostática a escolha da zona de separação para o modelo de captura do recirculador electrostático: ou o cilindro central com o diâmetro igual ao da saída de ar para a chaminé ou a parede do recirculador.

Tendo presente que estes modelos são os casos limite da captura no recirculador electrostático, são ambos considerados neste trabalho e a Figura 4.29 evidencia as curvas de eficiência fraccional base, para cada um dos quatro casos possíveis.

Na Tabela 4.27 apresenta-se a síntese das eficiências globais base para os casos apresentados na Figura 4.29.

Tabela 4.26 Parâmetros definidos para o caso de introdução ao modelo PACyc com recirculação electrostática

Definição	Variável	Unidade
Área Específica	1000	m ² /kg
Comprimento Fio	1.95	m
Diâmetro do Fio	1	mm
Potencial Aplicado	50	kV
Humidade	0.03	$V_{H_2O}/V_{ar,humido}$
Mobilidade iónica	2.1×10^{-4}	m ² /Vs

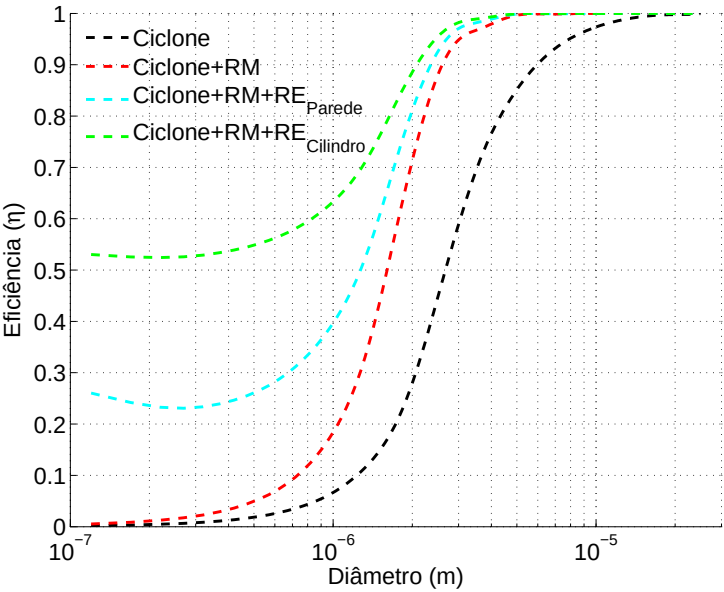


Figura 4.29 Linhas de base em função do sistema: ciclone isolado vs. ciclone com recirculação mecânica vs. ciclone com recirculação electrostática

É possível observar nas linhas de base que o fenómeno de recirculação mecânica desloca a curva de eficiência do ciclone para a esquerda, aumentando substancialmente a captura de partículas na zona de 1.5 μm, não prevendo qualquer aumento de eficiência para a captura das partículas mais pequenas.

Isto está de acordo com a teoria de Mothes e Löffler (1988) (e de Salcedo et al. (2007)) que prevê que o fenómeno de ciclonagem por si só não justifica a captura anormalmente elevada das partículas nos ciclones com ou sem recirculação. A recirculação

Tabela 4.27 Eficiências globais base em função da configuração do sistema

Caso	Base (%)
Ciclone isolado	81.08
Ciclone com RM	88.68
Ciclone com RE_{parede}	91.71
Ciclone com $RE_{cilindro}$	94.93

permite que as partículas estejam sujeitas durante mais tempo a fluxos ciclónicos assim como a maiores velocidades nesses fluxos, mas esses factos isolados, isto é, sem levar em linha de conta a aglomeração, não levam a que as partículas mais pequenas sejam capturadas.

Quando levado em linha de conta o fenómeno do campo electrostático, é observável que as partículas pequenas são capturadas de uma forma muitíssimo mais eficiente, prevendo, ambos os modelos, uma linha de base com uma forma ligeiramente de gancho, sendo este facto mais notório para o caso da superfície de captura ser a parede do recirculador. Isto é consequência directa da competição entre a carga por difusão (dominante para as partículas submicrométricas) e a carga por campo eléctrico (dominante para as partículas maiores) tal como discutido na Secção 2.4. A diferença entre os resultados obtidos considerando cada uma as duas interfaces de separação no recirculador é justificável pela distância que as partículas têm que percorrer até à superfície de separação, em cada um dos casos ser substancialmente diferente, e pelo campo eléctrico presente nas superfícies, que é significativamente maior no cilindro virtual.

4.5.2 Aglomeração com recirculação mecânica

Levando em linha de conta o fenómeno de aglomeração apenas com recirculação mecânica, o modelo PACyc prevê que este possa ser considerado em duas zonas distintas, com consequências distintas: aglomeração dentro do ciclone (este caso é em tudo semelhante ao do ciclone a funcionar isolado) e aglomeração na confluência da entrada do ciclone e da saída do recirculador.

As duas formas distintas de analisar o fenómeno de aglomeração quando o sistema opera com recirculação, são as seguintes:

- Alteração do tamanho das partículas ao longo da direcção axial do ciclone, tendo impacto na eficiência de captura destas ao longo do ciclone (caso amplamente estudado no ciclone isolado);

- Na alteração da distribuição mássica processada pelo ciclone devido ao fluxo cruzado de partículas na zona de confluência das partículas “frescas” e as partículas reinjectadas (caso apenas possível quando há recirculação);

Assim sendo, apresenta-se na Figura 4.30 as duas zonas onde o fenómeno de aglomeração é considerado quando se estuda o sistema ciclone com recirculação.

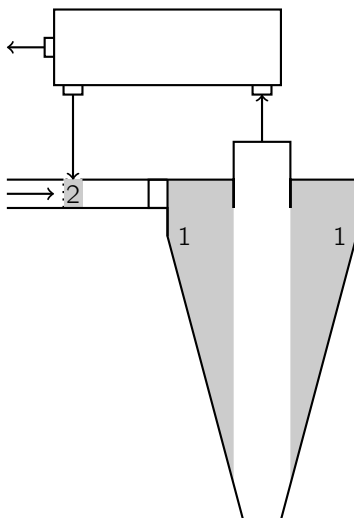


Figura 4.30 Representação das zonas de interacção interparticular do modelo PACyc

Na zona identificada na Figura 4.30 como 1, é estudada a alteração do tamanho das partículas ao longo da direcção axial do ciclone, enquanto na zona 2 é estudado o impacto do fluxo cruzado de partículas na distribuição processada pelo ciclone.

São duas formas diferentes de estudar o mesmo fenómeno, sendo distintas essencialmente na sua caracterização em termos de tempo de processamento das colisões interparticulares.

No ciclone (zona 1), os princípios do fenómeno aglomeração são os enunciados na Secção 4.3.3.

No caso da zona de fluxo cruzado (zona 2), assume-se um estado pseudo-estacionário da distribuição recirculada e faz-se um estudo dos choques num volume de controlo cúbico, permitindo apenas às partículas que colidam, que se aglomerem, tornando-se em partículas de maior tamanho. Neste volume não há remoção de partículas, havendo sim, alteração da distribuição inicial processada pelo ciclone, no sentido de haver menos partículas pequenas, uma vez que estas aglomeraram com as que recirculam, gerando uma distribuição mais grosseira processada pelo ciclone.

Nesta fase estuda-se a nova distribuição (obtida na zona 2), considerando válidas as novas curvas de eficiência teórica (obtidas na zona 1) gerando novas curvas de eficiência teórica em função da distribuição à entrada obtida pós-aglomeração.

De facto, para ser mais preciso, este processo deveria ser iterativo, uma vez que à semelhança do modelo de Salcedo et al. (2007), as alterações à entrada traduzem-se, até convergência, em curvas de eficiência teórica ligeiramente diferentes. No entanto, este processo considerou-se não iterativo devido ao elevado consumo de tempo de processamento e considerando simultaneamente que as alterações nos resultados finais não seriam muito substanciais. Com esta simplificação do modelo é considerado que todos os resultados estavam sujeitos a um erro, sendo em parte por isso que a aglomeração à entrada não seja usada no sentido de simular o fenómeno de aglomeração no sistema.

No entanto, os princípios detalhados associados a esta análise são apresentados no Apêndice D, sendo de destacar que a Figura D.3 mostra que a alteração da distribuição processada pelo ciclone é, de facto, residual.

Aglomeração dentro do ciclone com recirculação mecânica

Focando na aglomeração dentro do ciclone, os princípios teóricos do modelo PACyc são em tudo equivalentes aos apresentados na Secção 4.3. A diferença existe apenas nos valores da curva de eficiência base, sendo que neste caso correspondam ao valores apresentados na série a vermelho na Figura 4.29 em vez dos da série a preto.

Assim sendo, após obter a nova curva de eficiência de captura base, o modelo PACyc redefine o volume de controlo (usando o número de fatias e sub-fatias especificado pelo utilizador), é feito o pré-processamento da distribuição mássica à entrada e de seguida são analisadas as colisões e os aglomerados formados, reconstruindo o histórico de cada partícula e calculando a correspondente eficiência de captura.

Tendo presente a estrutura referida, a Figura 4.31 pretende evidenciar as curvas de eficiência fraccional quando o sistema esta a operar com recirculação mecânica e considerando apenas a aglomeração dentro do ciclone.

Na Tabela 4.28 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculadas pelo PACyc para os casos apresentados na Figura 4.31.

É possível constatar que o diâmetro para o qual as partículas têm captura total se mantém constante ($\approx 2.5\mu\text{m}$), mas que as partículas de $1\mu\text{m}$ triplicam de eficiência de captura (de $\approx 20\%$ para $\approx 60\%$). Constata-se que para o exemplo apresentado, os diâmetros mais pequenos têm uma eficiência de captura próxima entre eles ($\approx 40\%$).

O resultado da aglomeração dentro do ciclone considerando a recirculação mecânica adopta consistentemente um comportamento semelhante ao apresentado, uma vez que

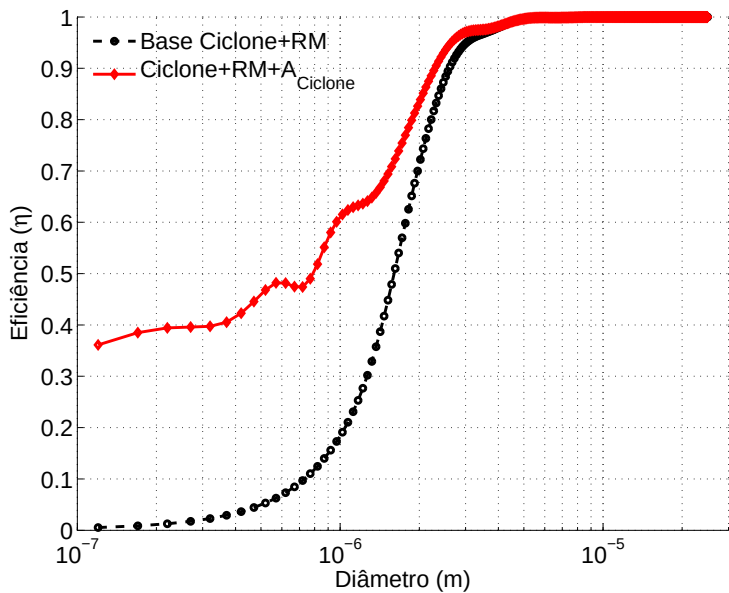


Figura 4.31 Curvas de eficiência fraccional quando o sistema está a operar com recirculador sem campo eléctrico e considerando apenas a aglomeração dentro do ciclone

Tabela 4.28 Eficiências globais com recirculação mecânica e aglomeração dentro do ciclone

Caso	Base (%)	PACyc (%)
Ciclone com RM	88.68	93.62

as curvas de eficiência base do ciclone e do ciclone com recirculação mecânica têm formatos similares: para as partículas pequenas ambas prevêem eficiências de captura próximas de zero, adoptando uma forma sigmóide até um que um determinado diâmetro prevêem uma eficiência de captura próxima de um.

Aglomeração à entrada e dentro do ciclone com recirculação mecânica

Considerando os dois fenómenos de aglomeração (quando ocorre aglomeração à entrada e dentro do ciclone), a simulação desta última dá origem a resultados muito pouco diferentes em termos de distribuição de tamanho de partículas a ser processada pelo ciclone, e acarreta consigo um esforço computacional adicional, sendo por esta razão que foi descartada como método para simular a aglomeração nos casos com recirculação,

Como se considerou que este tipo de simulação não acrescenta directamente nenhuma mais-valia ao trabalho apresentado nesta tese, apresenta-se no Apêndice D uma

descrição detalhada dos princípios onde se sustenta o estudo da aglomeração à entrada, sendo ainda apresentados os resultados obtidos para o caso de referência deste trabalho.

4.5.3 Aglomeração com recirculação electrostática

Para simular o caso em que no recirculador existe um campo eléctrico para favorecer a separação das partículas, é feito um acoplamento à imagem da recirculação mecânica, evidenciada na Secção 4.5.2 isto é, recorre-se à definição de uma nova linha de base. Para a obtenção desta considera-se apenas a parte referente à aglomeração dentro do ciclone, negligenciando a aglomeração à entrada.

No caso com recirculação electrostática, para a definição da linha de base, existem ainda dois parâmetros que devem ser levados em linha de conta:

- Definição da superfície de separação: ou o cilindro central virtual com diâmetro igual ao da saída de gás para a atmosfera ou a parede do recirculador.
- Definição da ordem da análise da aglomeração (dentro do ciclone): se esta é analisada *à posteriori* de todos os fenómenos aplicados, ou se esta é sobreposta à recirculação mecânica, aplicando a recirculação electrostática ao resultado da aglomeração sobre a recirculação mecânica;

Os princípios teóricos do modelo PACyc são em tudo equivalentes aos apresentados na Secção 4.3. A diferença existe apenas nos valores da curva de eficiência base apresentadas na Figura 4.29, sendo que conforme cada caso correspondem aos valores apresentados:

- na série a azul-ciano: quando a superfície de separação é a parede e a aglomeração é analisada *à posteriori* de todos os fenómenos;
- na série a verde quando a superfície de separação é o cilindro virtual central e a aglomeração é analisada *à posteriori* de todos os fenómenos;
- na série a vermelho sendo independente da superfície de separação e a aglomeração é analisada sobre os resultados da recirculação mecânica;

Assim sendo, à imagem do que é feito para o caso com recirculação mecânica, após obter a nova curva de eficiência de captura base, o modelo PACyc redefine o volume de controlo (usando o número de fatias e sub-fatias especificado pelo utilizador), é feito o pré-processamento da distribuição mássica à entrada e em seguida são analisadas

as colisões e os aglomerados formados, reconstruindo o histórico de cada partícula e calculando a correspondente eficiência de captura.

A Figura 4.32 evidencia as curvas de eficiência fraccional quando o sistema está a operar com recirculador com campo eléctrico, considerando apenas a aglomeração dentro do ciclone ocorre *à posteriori* de todos os fenómenos envolvidos.

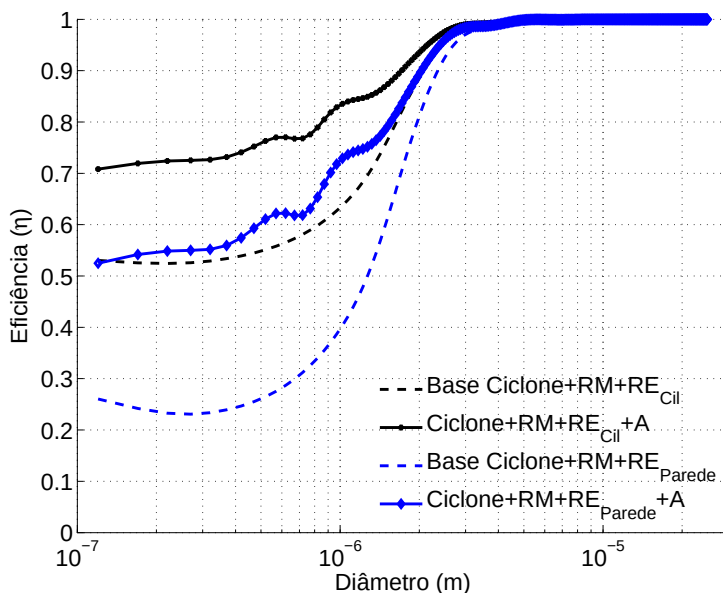


Figura 4.32 Curvas de eficiência fraccional quando o sistema está a operar com recirculador com campo eléctrico e considerando apenas a aglomeração dentro do ciclone e a linha de base com todos os fenómenos envolvidos

Na Tabela 4.29 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculadas pelo PACyc para os casos apresentados na Figura 4.32.

Tabela 4.29 Eficiências globais com recirculação electrostática com aglomeração *à posteriori*

Caso	Base (%)	PACyc (%)
Ciclone com RE _{parede}	91.71	95.51
Ciclone com RE _{cilindro}	94.93	97.27

Nas séries a azul e a preto da Figura 4.32 são evidenciadas as linhas de base em função da zona de separação no recirculador com campo electrostático. Estas correspondem às curvas azul-ciano e verde apresentadas na Figura 4.29.

Focando a Figura 4.32, considerando a parede como a superfície de separação, é notório que com o fenómeno de aglomeração dentro do ciclone, se perde a forma de gancho da linha de base, sendo no entanto substancialmente aumentada a eficiência de captura das partículas mais pequenas (de 25% de captura, passam para mais de 50% de captura). Fazendo uma comparação com os resultados da linha de base considerando a zona de separação o cilindro central, os resultados com aglomeração aproximam-se bastante destes, não havendo razão aparente para uma correlação causal entre estes factos, sendo de presumir que se trata de uma coincidência. Se se considerar que a colisão das partículas com a parede é o único fenómeno para a captura das partículas no recirculador electrostática, é possível referir que embora sejam obtidas eficiências fraccionais substancialmente superiores à linha de base para todos os diâmetros, esta pode ser considerada como a situação pior possível para a recirculação de partículas para o ciclone.

Ainda acerca da Figura 4.32, e considerando como superfície de separação o cilindro central, é notório que neste caso existe um aumento muito menos substancial da eficiência de captura das partículas mais pequenas (de 50% de eficiência de captura na linha de base, passam para $\approx 70\%$). Considerando esta zona como a responsável pela separação, são obtidas eficiências fraccionais superiores para todos os diâmetros, sendo esta a situação a melhor possível para a recirculação de partículas do recirculador.

É no entanto opinião do autor que o modelo que melhor ajusta a realidade se baseia na superfície de separação "cilindro-virtual", pois a função do recirculador não é a captura de partículas na sua parede, mas apenas limpar o canal central de escape para a chaminé.

É possível constatar que para os casos levando em linha de conta a aglomeração, as curvas de eficiência fraccional têm comportamentos semelhantes, isto é, a partir do valor mais baixo da eficiência fraccional (correspondente às partículas com menor diâmetro) as eficiências de captura têm a tendência a aumentar, até chegar ao patamar de captura completa. Neste caso, este patamar corresponde a um diâmetro de $\approx 2\mu\text{m}$, o que significa que o modelo consegue prever as elevadas capturas que estes sistemas têm das partículas mais pequenas ($\eta_{1\mu\text{m}-\infty} \geq 75\%$).

O resultado da aglomeração dentro do ciclone considerando a recirculação electrostática contorna a situação das baixas capturas prevista pelos sistemas ciclone isolado ou ciclone com recirculação mecânica, isto é, com recirculação electrostática nenhuma das versões do modelo prevê eficiências próximas de zero para as partículas pequenas, o que se aproxima mais da realidade, pois é sabido à partida que estes sistemas são muito eficientes na captura das partículas pequenas.

Considerando a aglomeração dentro do ciclone usando como linha de base apenas a

recirculação mecânica, a Figura 4.33 evidencia as curvas de eficiência fraccional quando o sistema está a operar com recirculador com campo eléctrico.

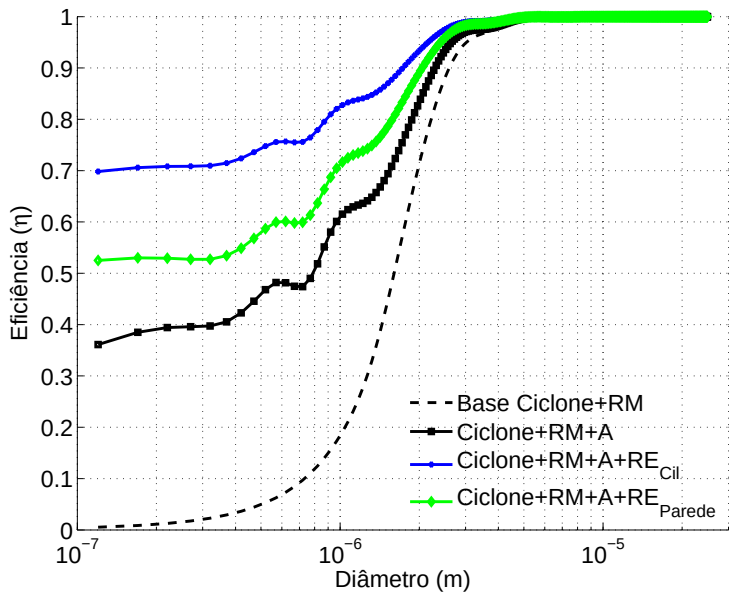


Figura 4.33 Curvas de eficiência fraccional quando o sistema está a operar com recirculador com campo eléctrico e considerando apenas a aglomeração dentro do ciclone e a linha de base apenas com a recirculação mecânica

Na Tabela 4.30 apresenta-se a síntese das eficiências globais base e calculadas pelo PACyc para os casos apresentados na Figura 4.33.

Tabela 4.30 Eficiências globais com recirculação electrostática com aglomeração entre a recirculação mecânica e a recirculação electrostática

Caso	Base (%)	PACyc (%)
Ciclone com RM	88.68	93.62
Ciclone com RE _{parede}	91.71	95.33
Ciclone com RE _{cilindro}	94.93	97.14

A Figura 4.33 evidencia na série a preto e a traço interrompido a linha de base para aglomeração sendo esta equivalente à série a preto na Figura 4.29. Apresenta também na série a preto o resultado de considerar a aglomeração dentro do ciclone, apenas para o caso com recirculação mecânica, correspondendo à série a vermelho da Figura 4.31. O cálculo das séries a verde e a azul foi feito usando directamente a equação 2.115.

É evidente que os resultados apresentados na Figura 4.33 são muito próximos dos apresentados na Figura 4.32, sendo possível concluir que é possível simular de uma forma “correcta” por qualquer um dos caminhos apresentados, isto é, independentemente da ordem da análise da aglomeração, são obtidos resultados após aglomeração muito semelhantes.

No sentido de tornar mais evidente as diferenças nas curvas de eficiência teórica em função do fenómeno de aglomeração se basear na recirculação mecânica ou na recirculação electrostática, a Figura 4.34 evidencia em maior detalhe as curvas de eficiência fraccional quando o sistema esta a operar com recirculador com campo eléctrico.

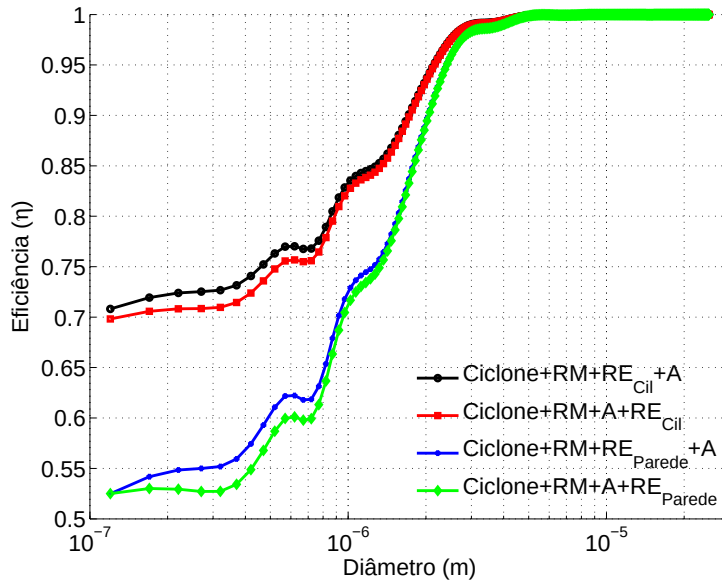


Figura 4.34 Detalhe das curvas de eficiência fraccional quando o sistema está a operar com recirculador com campo eléctrico e considerando apenas a aglomeração dentro do ciclone e a linha de base apenas com a recirculação mecânica

A Figura 4.34 valida a conclusão que ambos os métodos conseguem obter resultados próximos entre si, mesmo partindo de eficiências de base substancialmente diferentes, permitindo reafirmar que qualquer um dos caminhos de simulação conduz a resultados similares, tendo-se optado por usar por omissão as simulações considerando a aglomeração *à posteriori*.

4.6 Casos de estudo com resultados particulares

Considerando que o modelo precisaria ainda de testes exaustivos para que os resultados por ele produzidos fossem levados em linha de conta como válidos e reproduzíveis, foram efectuados estudos hipotéticos, no sentido de se observar o comportamento do modelo perante novas situações.

O objectivo desta secção passa não só por mostrar que o modelo conduz a resultados bastante distintos em função dos parâmetros, mas também mostrar alguns exemplos onde o modelo conduziu a resultados particulares, sendo estes discutidos quando este for o caso.

No sentido de facilitar a comparação entre os casos apresentados, apresenta-se no início de cada um deles as características que levaram à sua apresentação (parâmetros alterados nas simulações feitas) e em seguida são apresentados os parâmetros mantidos constantes entre todas as simulações apresentadas para cada caso.

De uma forma sistemática é apresentada a distribuição mássica cumulativa processada por cada um dos casos simulados, evidenciando e discutindo em seguida os resultados obtidos na simulação. Em relação às várias distribuições mássicas cumulativas, estas foram obtidas através ou de medições experimentais (que serão debatidas em maior detalhe no Capítulo 5) ou fornecidas por terceiros.

No sentido de identificar à partida as variáveis alteradas em cada um dos casos apresentados, apresenta-se no início de cada um dos casos as principais variáveis estudadas no caso e respectivos valores. Além disso, são ainda identificadas as variáveis mais relevantes para a simulação do modelo PACyc, como as condições de amostragem, o modelo de dispersão usado, entre outras.

Todas as simulações foram efectuadas considerando que o volume de controlo é contínuo e que os resultados apresentados foram obtidos a partir da primeira semente geradora de números aleatórios, ou seja, foi apenas realizada uma simulação.

Em relação aos dados acerca das partículas, todos os parâmetros específicos do modelo (distância de contacto, pressão de contacto, ...) foram mantidos constantes e adoptaram os valores médios dos estudos de sensibilidade apresentados previamente.

Nos casos com recirculação, a aglomeração à entrada foi descartada e em relação à aglomeração dentro do ciclone, esta foi sempre considerada *à posteriori* de todos os outros fenómenos.

4.6.1 Caso de estudo com ausência de aglomeração

Com este caso de estudo pretende-se mostrar o impacto dos seguintes parâmetros nos resultados de eficiência fraccional de captura:

- **Configuração do sistema:** evidencia-se o comportamento do ciclone isolado e compara-se com o efeito da recirculação mecânica, considerando que todas as condições operatórias se mantêm constantes (excepto a velocidade à entrada, uma vez que essa leva em consideração a fracção de recirculação);

Por outro lado, os restantes parâmetros foram mantidos constantes, de forma a que fosse possível fazer uma comparação entre os resultados. Desses parâmetros, salientam-se os mais relevantes entre os vários casos:

- **Distribuição cumulativa:** neste caso estudou-se uma distribuição de tamanhos de partículas, obtida experimentalmente após uma amostragem a granel;
- **Massa volúmica:** usa-se massa volúmica real $\rho = 1000\text{kg/m}^3$, que se traduz empiricamente por considerar que as partículas analisadas não são porosas;
- **Amostragem** do número de partículas a injectar a partir da distribuição numérica: usa-se a amostragem aleatória de 200k partículas;
- **Concentração** à entrada do sistema: para todas as simulações, considerou-se que a concentração à entrada tomava o valor de 0.4 g/m^3 ;
- **Condições operatórias:** mantêm-se constantes para todas as simulações realizadas, considerando valores médios para a velocidade de entrada assim como para os valores de pressão, temperatura e humidade.
- **Dimensão do sistema:** mantendo as proporções entre as relações que definem a geometria Hurricane[®], são estudados ciclones com diâmetro 750 mm; no caso com recirculação, o recirculador estudado tem um diâmetro 1300 mm;
- **Factor de fricção:** para os estudos levados a cabo neste caso, foi considerado que o factor de fricção corresponde ao do ciclone/recirculador industrial, isto é, $f = 0.02$;
- **Dispersão turbulenta:** considera-se válido o valor máximo obtido pela correlação proposta por Salcedo e Coelho (1999);

Análise da Distribuição à Entrada

Apresenta-se na Figura 4.35 a distribuição mássicas cumulativa para o caso 4.6.1.

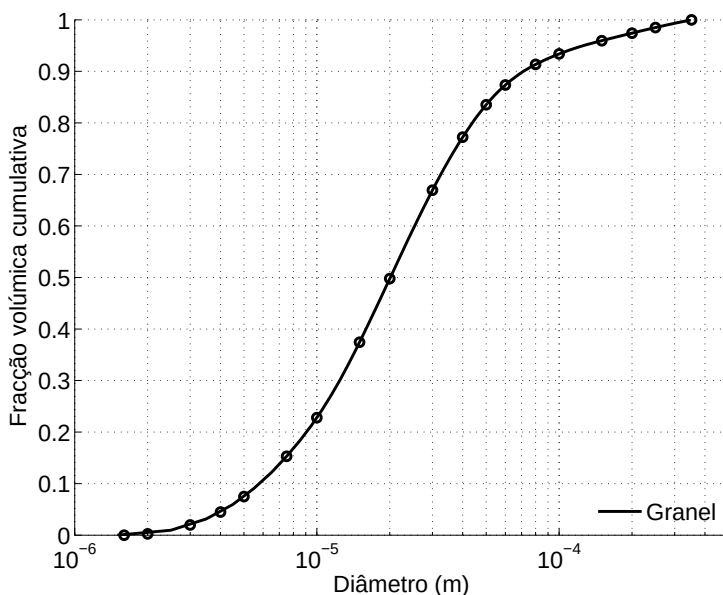


Figura 4.35 Distribuição de tamanho de partículas à entrada - Caso 4.6.1

É possível constatar que a distribuição a granel não tem partículas submicrométricas e tem $\approx 25\%$ abaixo de $10\mu\text{m}$, uma mediana de $\approx 20\mu\text{m}$ e que a totalidade das partículas são abaixo de $\approx 350\mu\text{m}$.

Perante estes dados é possível afirmar que é uma distribuição sem partículas finas, e é possível induzir que este facto vai prejudicar à partida a aglomeração das partículas mais pequenas com as partículas maiores, uma vez que o fenómeno de aglomeração é muito mais relevante para as partículas submicrométricas do que para partículas relativamente grandes.

Ausência de aglomeração com ciclone isolado

Considerando apenas o ciclone, foram efectuadas simulações no sentido de averiguar, em termos de aglomeração de partículas, o impacto destas serem ou não porosas. Para este estudo, considerou-se um ciclone com geometria Hurricane[®] e com um diâmetro de 750mm. Neste caso considerou-se o valor máximo para a dispersão turbulenta proposta por Salcedo e Coelho (1999).

Na Figura 4.36 apresentam-se os resultados das simulações do PACyc e da correspondente linha de base proposta por Mothes e Löffler (1988). O valor da massa volúmica usado foi $\rho_p = 1000\text{kg/m}^3$.

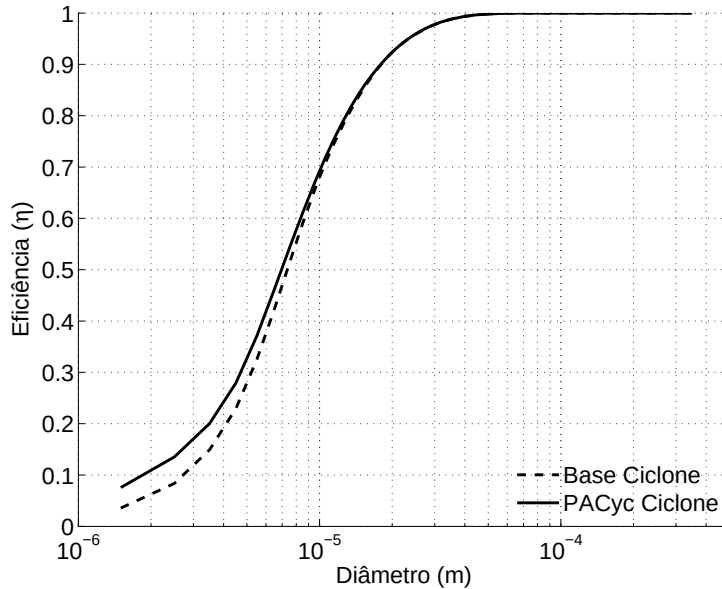


Figura 4.36 Caso de estudo 4.6.1 - Ciclone isolado

É possível constatar que a linhas de base está de acordo com o expectável, uma vez que para ciclones de maiores dimensões, a seu diâmetro de corte desloca-se no sentido das partículas maiores, no caso $\approx 7\mu\text{m}$.

Como teorizado na análise da distribuição de tamanho de partículas, para as condições de simulação apresentadas, o modelo PACyc não prevê praticamente aglomeração nenhuma.

Levando em consideração que as condições são similares à série correspondente a uma concentração de 1 g/m^3 apresentada no estudo de sensibilidade paramétrica à concentração à entrada (Figura 4.21), a justificação para que neste caso não ocorra aglomeração passa pela teoria avançada na contextualização deste caso: a inexistência de partículas a injectar (mais pequenas), ainda que existam partículas-alvo (maiores) condiciona de sobremaneira os resultados da aglomeração.

Ausência de aglomeração com ciclone com recirculação mecânica

Usando a mesma distribuição, foram simulados os casos considerando o ciclone a operar com recirculação mecânica.

Os resultados das simulações efectuadas são apresentados na Figura 4.37, sendo de destacar que estas foram efectuadas com a dispersão turbulenta no recirculador a ser estimada pela correlação proposta por Salcedo e Coelho (1999).

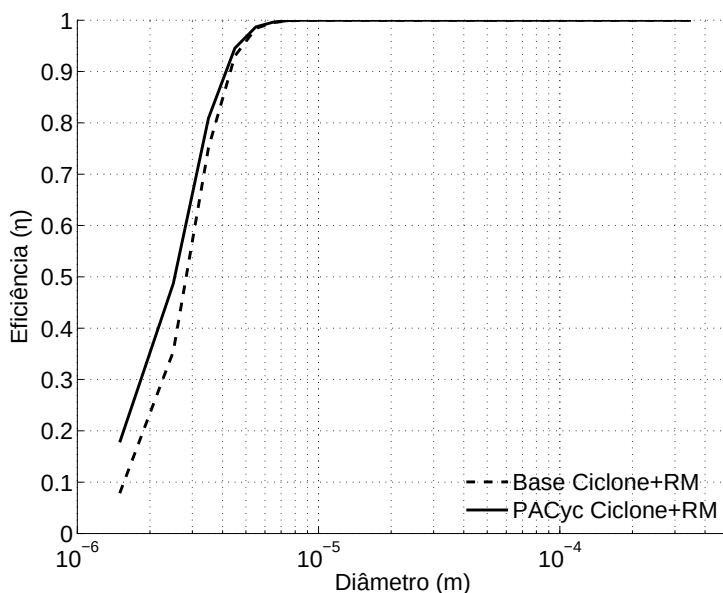


Figura 4.37 Caso de estudo 4.6.1 - Ciclone com recirculação mecânica

Comparando a Figura 4.36 e a Figura 4.37, os resultados da aglomeração para o caso com o ciclone a operar isoladamente e com recirculação são similares, isto é, para ambos os casos, é prevista uma aglomeração muito reduzida.

Comparando as linhas de base, levando em linha de conta o fenómeno de recirculação mecânica, observa-se um comportamento típico, já evidenciado no caso exemplo, apresentado na Figura 4.29, isto é, o diâmetro de corte diminui substancialmente, passando para partículas de $\approx 2.5\mu\text{m}$ após aglomeração.

Síntese das eficiências globais

Na Tabela 4.31 apresenta-se a síntese das eficiências globais (base e PACyc) para os casos apresentados neste caso de estudo 1.

Tabela 4.31 Eficiências globais caso 4.6.1

Figura	Caso	Base (%)	PACyc (%)
4.36	Ciclone Isolado	80.73	81.70
4.37	Ciclone com recirculação	97.78	98.25

Em termos de eficiência global é possível afirmar que para ambos os casos apresentados o aumento de eficiência global foi inferior a 1%, o que está de acordo com o evidenciado nas Figuras 4.36 e 4.37.

É no entanto relevante destacar que neste exemplo é possível uma vez mais observar a grande melhoria na eficiência que o sistema de recirculação implica, passando de uma eficiência global após aglomeração de $\approx 81.7\%$ para uma eficiência global após aglomeração superior de 98.2%.

4.6.2 Caso de estudo com supressão de corrente

Com este caso de estudo pretende-se mostrar o impacto dos seguintes parâmetros nos resultados de eficiência fraccional de captura:

- **Concentração** à entrada: através de uma correlação e do modelo PACyc é evidenciado o impacto do aumento de concentração;
- **Massa volúmica**: através do uso da massa volúmica real ou da massa volúmica aparente; à imagem dos casos anteriores, com este parâmetro define se as partículas são ou não porosas;

Por outro lado, os restantes parâmetros foram mantidos constantes, de forma a que fosse possível fazer uma comparação entre os resultados. Desses parâmetros, salientam-se os mais relevantes entre os vários casos:

- **Amostragem** do número de partículas a injectar a partir da distribuição numérica: usa-se a amostragem aleatória de 200k partículas;
- **Condições operatórias**: mantém-se constantes para todas as simulações realizadas, considerando valores médios para a velocidade de entrada assim como para os valores de pressão, temperatura e humidade.
- **Configuração do sistema**: todas simulações foram feitas levando em consideração que o sistema estava a operar com recirculação mecânica e electrostática. Em

termos da recirculação mecânica, usam-se valores médios para as velocidades à entrada e em relação à recirculação electrostática, aplica-se um campo eléctrico com um potencial de 50 kV, num eléctrodo de diâmetro 1 mm com o comprimento igual ao do recirculador;

- **Dimensão do sistema:** mantendo as proporções entre as relações que definem a geometria Hurricane[®], é estudado o ciclone com diâmetro 447 mm;
- **Dispersão turbulenta:** considera-se sempre válido o valor pior calculado pela correlação proposta por Salcedo e Coelho (1999);
- **Distribuição cumulativa:** neste caso estudou-se a distribuição de tamanhos de partículas medida experimentalmente a partir de uma amostra de produto a granel;
- **Factor de fricção:** para os estudos levados a cabo neste caso, foi considerado que o factor de fricção corresponde ao do ciclone com paredes polidas, isto é, $f = 0.007$;

Análise das Distribuições à Entrada

Apresenta-se na Figura 4.38 a distribuição mássica cumulativa para o caso 4.6.2.

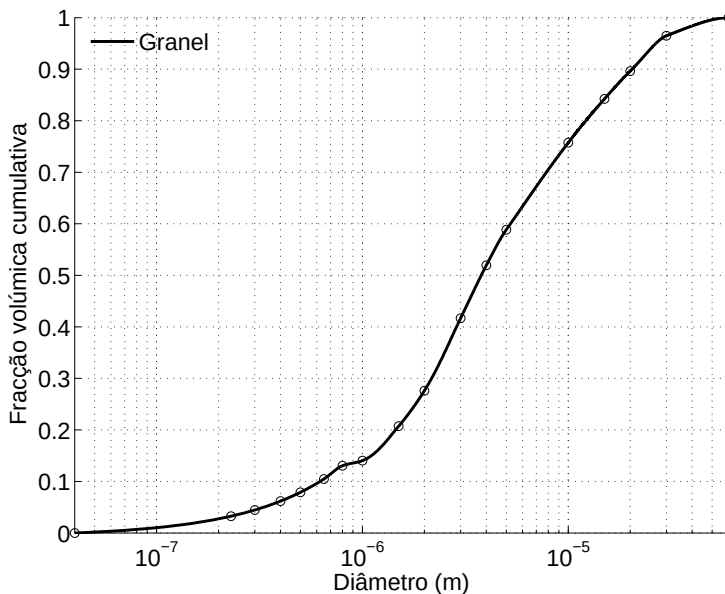


Figura 4.38 Distribuição de tamanho de partículas à entrada - Caso 4.6.2

É possível constatar que a distribuição tem $\approx 12\%$ abaixo de $\approx 1\mu\text{m}$, uma mediana de $\approx 3.9\mu\text{m}$ e que a totalidade das partículas são abaixo de $\approx 60\mu\text{m}$. Trata-se por isso de uma distribuição bastante larga mas com partículas muito pequenas, sendo por isso um bom caso de estudo, no sentido de evidenciar o impacto da co-existência de partículas grandes e de partículas pequenas.

Linha de Base

Apresenta-se na Figura 4.39 a linha de base para o modelo de aglomeração para o caso 4.6.2. Apresenta-se ainda o resultado de uma das simulações, para que se consiga relativizar o aumento de eficiência prevista pelo modelo PACyc, tendo esta sido obtida com a massa volúmica aparente 1080 kg/m^3 e uma concentração à entrada de 120 g/m^3 .

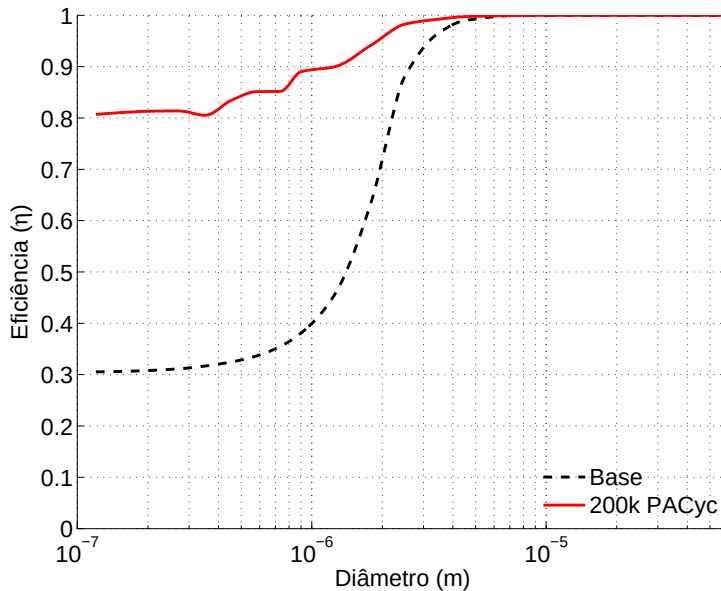


Figura 4.39 Linha de base e caso exemplo ($\rho_{ap} = 1080\text{kg/m}^3$, $c=120\text{g/m}^3$) - Caso 4.6.2

Tendo em conta que o sistema estudado considerando a recirculação mecânica e electrostática, é possível evidenciar que para os sistemas com esta configuração, que à partida são previstas eficiências de captura substancialmente diferentes dos sistemas a operar só com o ciclone ou do ciclone com recirculação mecânica, principalmente para as partículas mais pequenas.

Para o sistema a operar a elevadas concentrações, conforme apresentado na Figura 4.39 e considerando que a amostragem aleatória de 200k partículas é representativa da distribuição apresentada, o sistema consegue prever eficiências de captura muito elevadas, o que está de acordo com o expectável.

Estudo da concentração

No sentido de averiguar o impacto isolado da concentração, apresentam-se na Figura 4.40 os resultados das simulações com concentração baixa ($c=1\text{g/m}^3$), concentração média ($c=10\text{g/m}^3$) e concentração alta ($c=120\text{g/m}^3$).

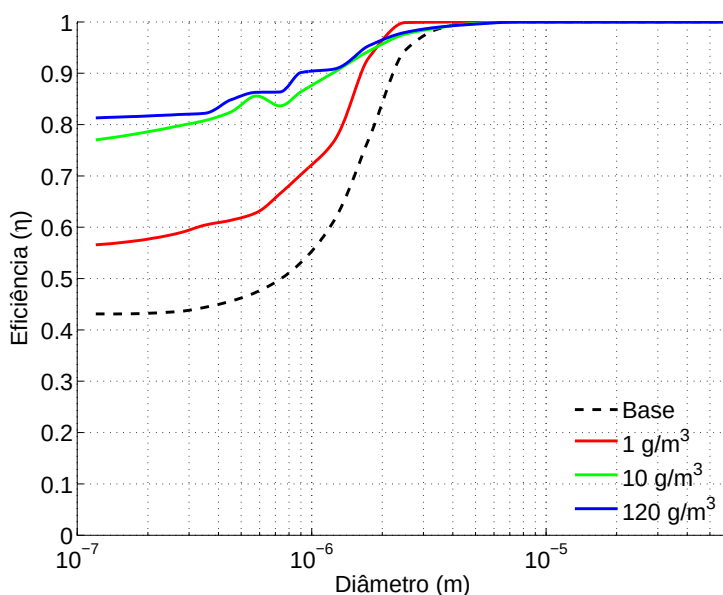


Figura 4.40 Curvas de eficiência fraccional em função da concentração, com $\rho = 1800\text{kg/m}^3$
- Caso 4.6.2

É possível constatar que para o caso a concentração baixa, a performance do sistema piora substancialmente, mas que para os casos a média e alta concentração os resultados são similares.

Isto acontece uma vez que a partir de um determinado valor de concentração, a performance do sistema de recirculação electrostática piora, devido ao fenómeno de supressão de corrente, não sendo possível aumentar a eficiência de captura das partículas por este mecanismo. Isto acontece devido à supressão de corrente que é tanto maior quanto maior é a concentração, conforme é evidenciado pelas equações 2.87 e

2.88. A partir de um dado valor de concentração, o sistema não consegue gerar o número suficiente de iões, não conseguindo carregar mais partículas, o que implica que se aumentarmos a concentração, estas partículas extra não serão carregadas, piorando a performance do sistema.

Este fenómeno tinha sido previamente introduzido na Secção 2.4.3, sendo apenas evidenciado claramente neste caso de estudo.

Síntese das eficiências globais

Na Tabela 4.32 apresenta-se a síntese das eficiências globais (base e PACyc) para os casos apresentados neste caso de estudo 4.6.2.

Tabela 4.32 Eficiências globais caso 4.6.2

Figura	Caso	Base (%)	PACyc (%)
4.39	ρ_{ap} , 200k, $c=120 \text{ g/m}^3$	82.24	96.22
	ρ , 200k, $c=1 \text{ g/m}^3$		93.33
4.40	ρ , 200k, $c=10 \text{ g/m}^3$	86.74	96.59
	ρ , 200k, $c=120 \text{ g/m}^3$		97.07

Em termos de eficiência globais, os resultados estão de acordo com o que foi evidenciado nas Figuras 4.39 e 4.40 sendo apenas relevante destacar que as partículas porosas a alta concentração, têm uma eficiência global similar às partículas não porosas a concentração média, permitindo evidenciar o impacto que esta realidade tem na performance deste tipo de sistemas.

4.7 Síntese

O modelo PACyc pretende mostrar o impacto que a aglomeração interparticular tem na eficiência de captura de sistemas de ciclones de elevada eficiência.

Para o sistema com ciclone Hurricane[®] a operar isoladamente, pode-se constatar que a abordagem de acoplar os fenómenos propostos por Mothes e Löffler (1988), por Ho e Sommerfeld (2002) e Sommerfeld e Ho (2003) conduz a resultados que mais nenhum modelo de previsão de eficiência de captura de ciclones consegue, permitindo afirmar que este modelo poderá abrir caminho a que se possam desenvolver modelos mais precisos na previsão da captura efectiva de ciclones de alta eficiência.

Da mesma forma, poder-se-á afirmar que para os sistemas com recirculação mecânica (referido como ReCyclone[®] MH), o acoplamento adicional do modelo de Salcedo et al.

(2007) produz resultados de acordo com o expectável, podendo afirmar que quando se estuda o caso com campo eléctrico no recirculador (referido como ReCyclone[®] EH), o modelo baseado nos modelos previamente estabelecidos por White (1963), Oglesby (1978) e Parker (1997) conduz a bons resultados.

Neste capítulo foram apresentados em detalhe os princípios base que levaram à possibilidade da reconstrução do histórico de cada uma das partículas inicialmente injectada, assim como os princípios de cálculo para determinar a quantidade de partículas a injectar conforme os casos em estudo, com que velocidades estas são injectadas assim como todos os princípios levados em consideração no cálculo da eficiência de captura pós-aglomeração.

Depois destas explicações detalhadas, foram evidenciados os impactos das principais variáveis do modelo de aglomeração usado neste trabalho assim como do modelo PACyc, fazendo uma análise de sensibilidade à variação destas. Nessa altura é feita uma explicação dos resultados obtidos e são apresentadas as hipóteses mais relevantes no sentido de justificar os resultados obtidos.

No sentido de mostrar a reprodutibilidade do modelo, na Secção 4.6 foram apresentados dois casos de estudo, onde foi possível observar que nas mais variadas configurações e condições de operação, o modelo de aglomeração conduziu a resultados com sentido físico, havendo ainda a necessidade de validar o modelo experimentalmente, facto que será feito no Capítulo 5.

Uma das principais conclusões a reter acerca do modelo PACyc, é que este, ainda que preveja aumento da eficiência de captura das partículas pequenas para o ciclone isolado, para casos a concentrações muito diluídas não consegue chegar a valores de eficiências próximos dos experimentalmente obtidos. Assim sendo, a estas escalas, outros fenómenos (como por exemplo a captura de partículas arrastadas pelos grandes turbilhões - *Large Eddy*) poderão justificar as elevadas capturas de partículas finas no ciclone (Salcedo et al., 2007).

Nomenclatura

Caracteres romanos

a	Parâmetro dependente do número de Reynolds da partícula
a	Altura da entrada do ciclone (m)
a_{out}	Altura da saída do recirculador (m)
b	Parâmetro dependente do número de Reynolds da partícula
b	Largura da entrada do ciclone (m)
b_{out}	Largura da saída do recirculador (m)
C	Concentração mássica de partículas à entrada (kg/m^3)
$d_{p,i}$	Diâmetro médio da classe i (m)
d_{trun}	Classe do diâmetro de truncatura
e_{pl}	Coeficiente de restituição energético após colisão
$f_{n,i}$	Fracção numérica das partículas com diâmetro i no início
$f_{w,i}$	Fracção mássica das partículas com diâmetro i no início
$INFO_{i,j}$	Estrutura onde está armazenada toda a informação acerca do número de partículas da classe i que se deslocaram para a classe j
M	Massa molecular do fluido (kg/mol)
m_{total}	Massa total de partículas no ciclone (kg)
$N_{aglomerados}^{Total}$	Número total de aglomerados
$N_{classes}$	Número de classes originais
$N_{diametros}^f$	Número de diâmetros finais (após colisão)
N_{fatias}	Número de fatias
$n_{i,j}$	Número de partículas da classe i que se deslocaram para a classe j
$n_{injectar,i}$	Número de partículas a injectar no volume de controlo do diâmetro i
$n_{original,i}$	Número em proporção de partículas do diâmetro i dentro do ciclone
$N_{particulas}^f$	Número de partículas finais
$n_{real,d_{trun}}$	Número de partículas da diâmetro de truncatura
$n_{real,final}$	Número final virtual de partículas dos diâmetros gerados que pertencem a uma dada classe
$n_{real,i}$	Número real de partículas do diâmetro i dentro do ciclone
$n_{real,inicial}$	Número inicial virtual de partículas dos diâmetros gerados que pertencem a uma dada classe
$n_{recirculadas,i}$	Número de partículas recirculadas
p_{pl}	Pressão limite de contacto entre as partículas (Pa)
Q_{in}	Caudal total à entrada (m^3/s)
Q_{recir}	Caudal recirculador à entrada (m^3/s)
$V_{ciclone}$	Volume do ciclone (m^3)
$V_{controlo}$	Volume de controlo (m^3_{fluido})
$V_{cr,1\mu m}$	Velocidade critica para aglomeração de uma partícula de $1\mu m$

V_{fluido}	Volume real do fluido (m^3_{fluido})
$V_{particulas}$	Volume real das partículas (m^3_{solido})
x_{50}	Diâmetro de corte (m)
z_0	Distância de contacto (m)

Caracteres gregos

α	Rácio entre o volume de partículas e o volume de gás ($m^3_{solido}/m^3_{fluido}$)
α_R	Rácio entre o volume de partículas e o volume de gás
$\eta_{c,loop}$	Eficiência do ciclone a funcionar em ciclo fechado
η_i^{fatia}	Eficiência de uma partícula do diâmetro i em cada fatia
$\eta_i^{final,*}$	Eficiência final de uma partícula pertencente à classe i
η_i^{final}	Eficiência de uma partícula do diâmetro i no final do ciclone
η_j^{fatia}	Eficiência por fatia de uma partícula pertencente à classe i
η_R	Eficiência do recirculador a funcionar em ciclo fechado
μ	Viscosidade do fluido (kg/ms)
ρ	Massa volúmica do fluido (kg/m^3)
ρ_p	Massa volúmica das partículas (kg_{solido}/m^3_{solido})
τ	Tempo médio de passagem do gás dentro do ciclone (s)

Capítulo 5

Resultados Experimentais e Previsões PACyc

Sumário do Capítulo

Este capítulo tem como propósito introduzir o sistema à escala piloto que é modelizado neste trabalho e comparar resultados obtidos experimentalmente com as respectivas previsões do modelo PACyc.

Apresentam-se ainda os tipos de amostragem feitos na instalação à escala piloto, assim como os exemplos de cálculo para um caso particular, de forma a sustentar os resultados experimentais apresentados.

O objectivo directamente ligado ao desenvolvimento de um bom modelo matemático é a sua capacidade de previsão de uma dada característica do sistema modelizado, sendo isto conseguido através de relações matemáticas mais ou menos complexas, em função dos casos. Para validar esse modelo, isto é, para que se confie nos resultados previstos, é necessário que este produza resultados próximos dos obtidos experimentalmente. Tendo este princípio presente, este capítulo pretende comparar as performances do equipamento estudado neste trabalho às respectivas previsões do modelo PACyc.

Assim sendo, começa-se por contextualizar o sistema assim como as condições operatórias mais relevantes. Com isto pretende-se evidenciar as condições operatórias usadas nos vários casos apresentados no final deste capítulo. Esta caracterização é feita ao nível dos caudais (volúmicos e mássicos), das perdas de pressão (no ciclone, recirculador e no sistema) e das velocidades (à entrada/saída do sistema e do ciclone) no sistema piloto.

Em seguida são apresentadas as condições de amostragem (*online* e *offline*), assim como são destacados os principais cuidados a ter para as fazer correctamente. Por

último é apresentado um exemplo de cálculo (desde caudais, passando por concentrações e eficiências), de forma a contextualizar todos os resultados apresentados daí em diante. Em relação aos casos experimentais, estes são apresentados não só para evidenciar a capacidade de captura dos sistemas, mas também para destacar o impacto de algumas das variáveis anteriormente referidas na performance do sistema. Em função dos vários resultados experimentais, são retiradas algumas conclusões acerca da capacidade de previsão do modelo.

5.1 Condições operatórias

Para identificar os principais constituintes do sistema, apresenta-se na Figura 5.1 uma fotografia da instalação experimental à escala piloto, sendo que foi neste sistema que foram efectuados todos os ensaios experimentais apresentados neste trabalho.

O sistema que foi vastamente estudado neste trabalho, é constituído por um ciclone com geometria patenteada de 447 mm de diâmetro, tendo esta sido obtida após um processo de optimização numérica.

Esta geometria é patenteada, tendo sido cedido os direitos de exploração à empresa Advanced Cyclone Systems, S.A. estando referenciada como ciclones Hurricane® (Salcedo, 2000). Esta instalação piloto tem ainda acoplado um ciclone recirculador de passo simples, sistema que por sua vez se encontra também patenteado e que está referenciado por ReCyclone® MH (Salcedo, 2002).

Quando neste sistema se aplica um campo eléctrico no recirculador sendo este gerado por um eléctrodo para que se maximize a recirculação de partículas, o sistema designa-se por ReCyclone® EH, igualmente patenteado (Salcedo, 2008). Como referência de interesse, as elevadas performances deste sistema permite que este tenha já diversas aplicações a nível industrial, sendo disso exemplo o ReCyclone® MH instalado na fábrica de produção de ácido sulfanílico presente nas instalações da empresa CUF - Químicos Industriais, S.A., co-financiador deste trabalho.

Focando na instalação à escala piloto, a respectiva constituição esquemática é apresentada na Figura 5.2. Nesta são identificadas as picagens na tubagem (quadrados), as tomas de pressão (círculos) e as principais correntes do sistema.

Os pontos de amostragem e que equipamentos são a eles ligados é função da configuração do sistema, como apresentado na Figura 5.3. Nesta Figura ficam evidentes as limitações de amostragem à entrada que serão debatidas adiante.

Em relação às tomas de pressão, estas estão posicionadas de forma a que seja sempre possível estimar as perdas totais de pressão do sistema (entre a toma 1 e a toma 3),



Figura 5.1 Fotografia da instalações piloto e identificação dos componentes principais do sistema

assim como as perdas de pressão no ciclone (entre a toma 1 e a toma 2). Com estes dois valores, é possível obter a perda de pressão no recirculador através da diferença de perda de pressão entre as perdas totais no sistema e a perdas no ciclone.

Em relação às picagens na tubagem, estas estão posicionadas ora à entrada ora à saída do sistema. Focando as picagens à entrada, uma delas está posicionada a montante da confluência da corrente recirculada (picagem 1), enquanto a outra se encontra a jusante desta (picagem 2). Em relação às picagens à saída (picagens 3 e 4), ambas se encontram na tubagem de saída para a chaminé. A picagem 5 nunca foi utilizada no decorrer deste trabalho.

Com estas picagens é possível fazer simultaneamente:

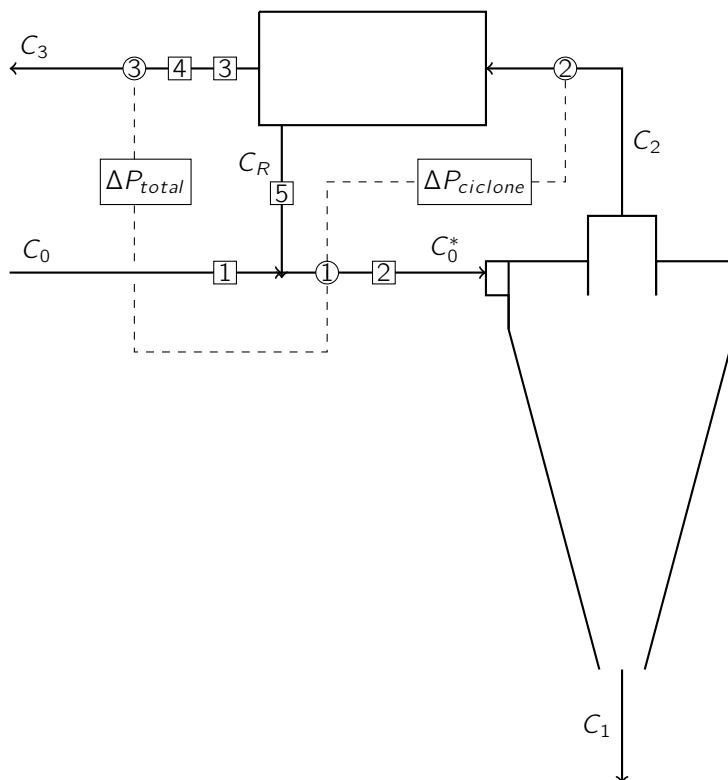


Figura 5.2 Diagrama P&ID simplificado à escala piloto: identificação das picagens na tubagem (quadrados), tomas de pressão (círculos) e correntes do sistema

- Amostragem *online* à entrada e saída e amostragem isocinética à saída;
- Amostragem isocinética à entrada e saída e amostragem *online* à saída;

No sentido prático, o que se faz por omissão, é uma curta amostragem *online* à entrada e à saída (sem qualquer amostragem isocinética). Em seguida, considerando a distribuição à entrada constante, o ensaio quantitativamente representativo faz-se com uma amostragem isocinética à entrada e saída e amostragem *online* à saída, corrigindo a massa à entrada com o valor correcto obtido pela isocinética. Esta operação será descrita em maior detalhe na Secção 5.4.3.

Sendo esta a configuração de amostragem por omissão, favorece a precisão dos resultados da amostragem *online*, uma vez que o equipamento de amostragem *online* satura a partir de concentrações moderadamente baixas ($> 100\text{mg/m}^3$). Posicionando a sonda de amostragem *online* apenas à saída, garante-se que esta está na zona com a

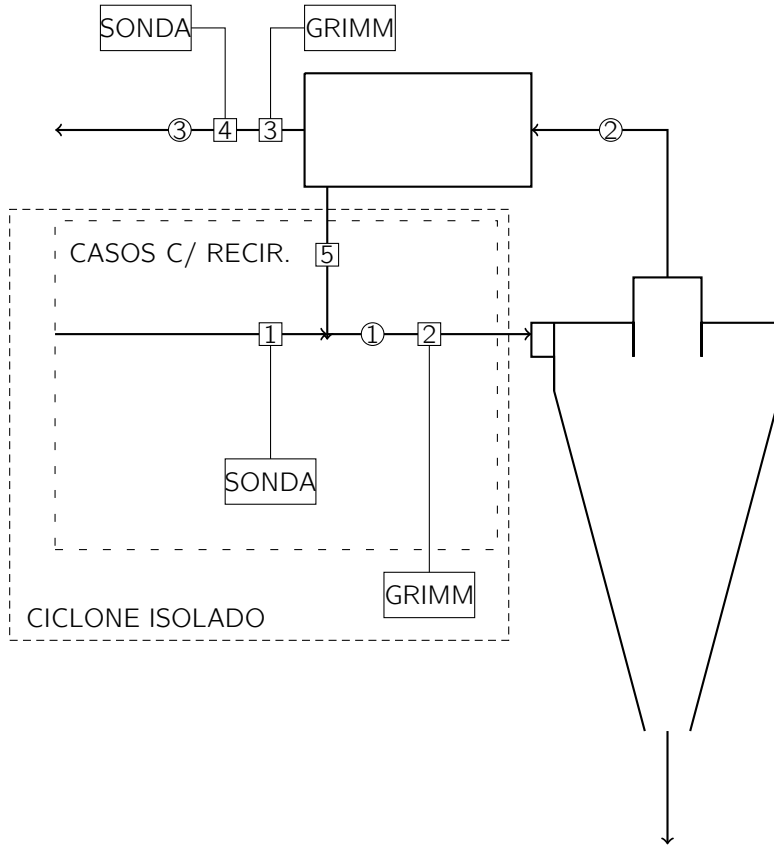


Figura 5.3 Diagrama P&ID simplificado à escala piloto: identificação das picagens na tubagem a locais de montagem dos principais equipamentos de medida em função da configuração do sistema

concentração mais baixa, o que leva a que o equipamento tenha menor tendência para saturar, logo, produzindo resultados mais fidedignos.

Em relação à identificação das correntes, estas estão referenciadas pelas respectivas concentrações e pode-se afirmar que as correntes relevantes para a análise da performance do sistema, são C_0 (concentração à entrada) e C_3 (concentração à saída), uma vez que a eficiência global do sistema é dada, seja qual for a configuração do sistema, pela equação 5.1 e a correspondente eficiência fraccional é dada pela equação 5.2.

$$\eta = 1 - \frac{C_3}{C_0} \quad (5.1)$$

$$\eta(d_p) = 1 - \frac{C_3(d_p)}{C_0(d_p)} \quad (5.2)$$

Em relação aos ventiladores usados, ambos estão ligados a variadores de frequência que permitem um controlo mais adequado dos caudais de ar que entram e/ou recirculam no sistema. Assim sendo, no sentido de mostrar as gamas de frequência de funcionamento dos ventiladores instalados no sistema, foi feito previamente um varrimento da sua gama de frequências.

Tendo em conta que os ventiladores funcionam de forma “competitiva”, por norma considera-se que o ventilador principal opera a uma frequência menor ou igual à frequência do ventilador de recirculação, uma vez que, se o ventilador de recirculação operar a uma frequência menor do que a do ventilador principal, o ventilador de recirculação sai da sua curva de operação, e entra em fluxo em sentido inverso desligando-se, de forma a proteger o motor.

Em seguida apresentam-se os valores experimentais dos caudais, velocidades e pressões obtidos na instalação piloto, em função das frequências de funcionamento dos motores dos ventiladores.

5.1.1 Caudais

Focando os caudais em cada uma das zonas do sistema, usando a equação da continuidade constata-se que os caudais mássicos são iguais nas zonas das picagens 1, 3 e 4, sendo estes os caudais que dão entrada e saída no sistema. Como a pressão absoluta na conduta é muito semelhante nestes pontos, os caudais volúmicos são igualmente muito semelhantes. O impacto da recirculação faz-se sentir na zona da picagem 2, sendo estes referenciados como caudais após recirculação.

Tendo em conta o referido, a Figura 5.4(a) apresenta o caudal mássico à saída (ou entrada) do sistema em função da frequência dos ventiladores do sistema, sendo que cada série se refere a uma dada frequência do ventilador principal (experimental representada pelos pontos, ou ajustada por um modelo matemático, representada pelas linhas), o eixo dos xx corresponde à frequência do ventilador de recirculação e o eixo dos yy corresponde ao caudal mássico à saída (ou entrada) do sistema.

Para evidenciar que o modelo de previsão do caudal mássico em função das frequências dos ventiladores produz resultados próximos dos obtidos experimentalmente, a Figura 5.4(b) apresenta um modelo de ajuste linear entre o caudal mássico médio e a correspondente previsão pelo modelo. Atesta-se a qualidade do modelo de ajuste pelo

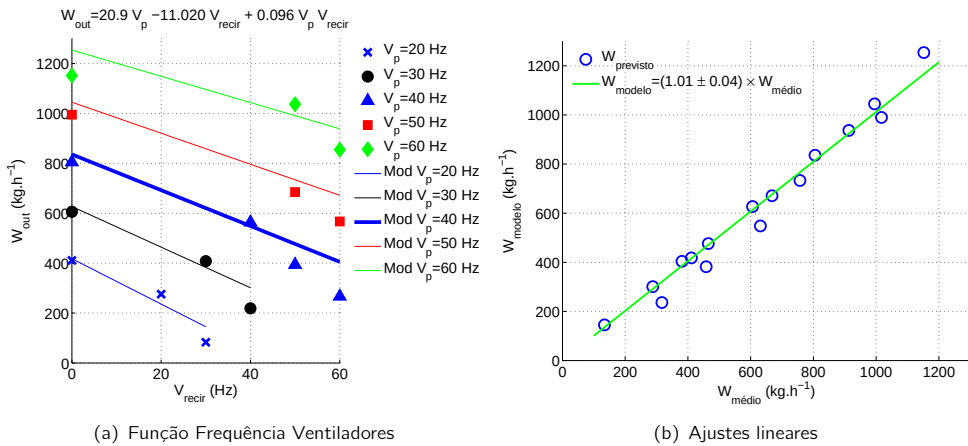


Figura 5.4 Caudal mássico do sistema à escala piloto

valor do coeficiente de determinação e conclui-se que estatisticamente o valor da ordenada na origem é nulo, não havendo assim erros sistemáticos.

Analisando em detalhe a Figura 5.4(a), é possível constatar que para os casos em que o sistema opera sem recirculação ($V_{recir} (Hz) = 0$), o modelo de ajuste prevê valores abaixo dos obtidos experimentalmente, tendo a tendência contrária conforme se aumenta a frequência do ventilador de recirculação. Não negligenciando estas constatações, o modelo de ajuste a três parâmetros prevê valores bastantes próximos dos obtidos experimentalmente e tendo em conta a sua simplicidade e a sua ampla aplicabilidade na gama de frequências usadas neste trabalho, considera-se que a equação presente na Figura 5.4(a) é válida para prever o caudal mássico de ar que entra e/ou sai do sistema.

Pela Figura 5.4(b) constata-se que o modelo de ajuste e o valor experimental são muito próximos, validando por isso o modelo de ajuste.

De forma semelhante ao caudal mássico, é possível condensar a informação acerca do caudal volúmico em função das frequências do ventilador. A Figura 5.5(a) apresenta o caudal volúmico à saída do sistema em função da frequência dos ventiladores do sistema, enquanto a Figura 5.5(b) apresenta um modelo de ajuste linear entre o caudal volúmico médio e o previsto pelo modelo.

O modelo de ajuste descreve de uma forma simples e razoável o caudal volúmico do sistema em função das frequências dos ventiladores e é apresentado na Figura 5.5(a). Embora isto aconteça, é de referir que para o caso do caudal volúmico o modelo de ajuste tende a prever valores de caudais volúnicos acima dos obtidos experimental-

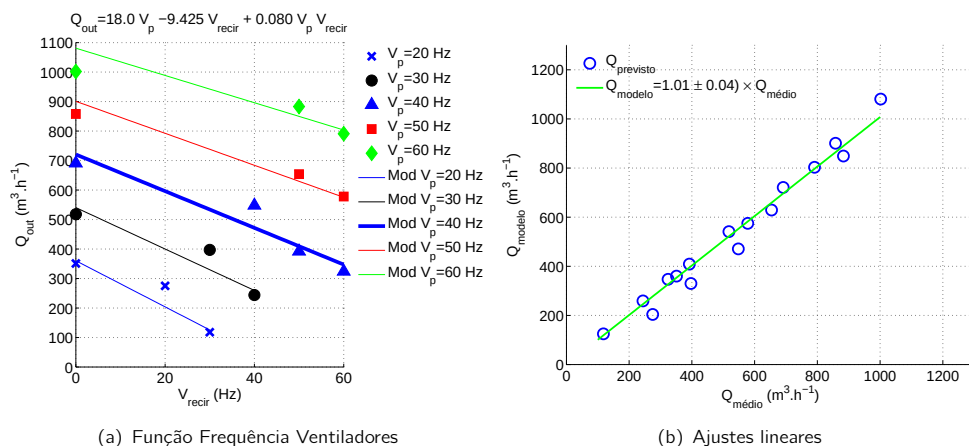


Figura 5.5 Caudal volúmico do sistema à escala piloto

mente quando o sistema opera sem recirculação, tendendo para valores muito próximos dos experimentalmente obtidos para elevados valores de frequência do ventilador de recirculação.

Uma das variáveis com impacto directo nas equações de previsão do funcionamento do ciclone, é a velocidade média à entrada. Uma forma de estudar esta variável, é o estudo do caudal volúmico de gás à entrada do ciclone. De uma foram empírica, é de esperar que esta variável tenha um comportamento inverso em relação às variáveis apresentadas nas Figuras 5.4(a) e 5.5(a), pois conforme se aumenta a frequência do ventilador de recirculação, a velocidade de entrada do gás no ciclone deve aumentar, uma vez que a fracção de gás recirculada aumenta.

Tendo presente estas induções, a Figura 5.6(a) apresenta o caudal volúmico à entrada do ciclone em função da frequência dos ventiladores do sistema. À imagem dos caudais mássico e volúmico à saída do sistema, apresenta-se na Figura 5.6(b) a comparação entre o valor de caudal à entrada experimental e o valor previsto pelo modelo de ajuste.

Como anteriormente teorizado, o valor da velocidade de entrada do gás no ciclone aumenta conforme se aumenta a frequência do ventilador de recirculação e além disso, usando um modelo com a mesma estrutura dos usados para os caudais mássicos e volúmico à entrada e/ou saída do sistema, consegue-se fazer uma descrição adequada do caudal de entrada no ciclone.

Para terminar a caracterização em termos de caudais e velocidades do sistema estudado e levando ainda em linha de conta que a amostragem isocinética é feita no centro

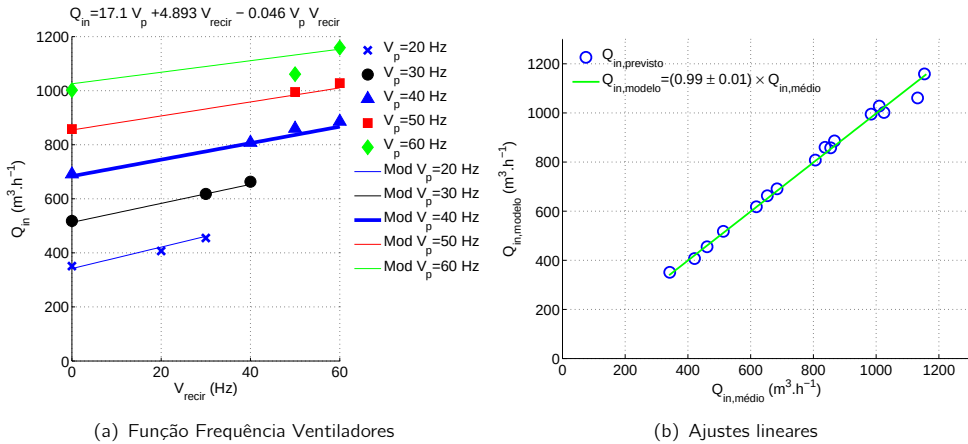


Figura 5.6 Caudal volúmico à entrada do ciclone à escala piloto

da tubagem, foi feito um estudo da velocidade central na tubagem em função da velocidade média. O resultado desse estudo é traduzido na Figura 5.7, de onde se pode concluir que o sistema opera em condições turbulentas, uma vez que a velocidade no centro é $\ll 2U_{médio}$, logo não adoptando um perfil de velocidade parabólico consistente com escoamento laminar e que de facto a velocidade no centro é cerca de 22% superior à velocidade média de entrada/saída do sistema.

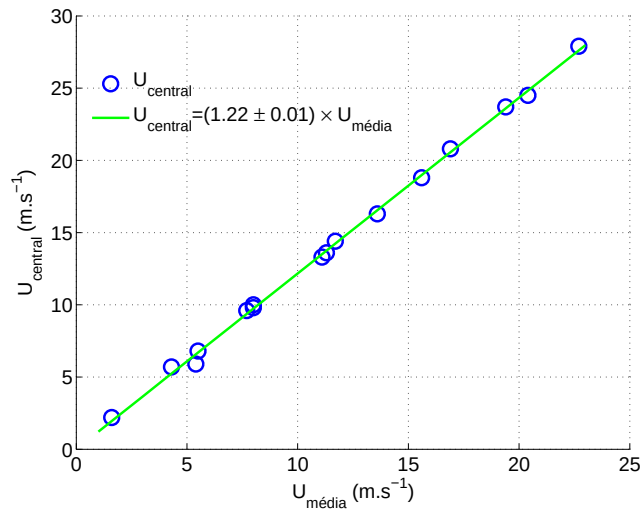


Figura 5.7 Velocidade central na tubagem em função da velocidade média à entrada/saída do sistema

Focando os ajustes feitos para as Figuras 5.4(a), 5.5(a) e 5.6(a), é possível constatar que todas elas apresentam um modelo de ajuste matemático com a mesma estrutura. Esta estrutura simples (modelo a três parâmetros) segue uma estrutura de modelo competitivo, sendo esta traduzida, para o caudal mássico total, pela equação 5.3, onde estão identificados os termos de cada um dos ventiladores assim como o termo competitivo. Nesta equação A , B e C são parâmetros de ajuste do modelo desenvolvido, V_p é a frequência do ventilador principal e V_{recir} é a frequência do ventilador de recirculação.

$$W_{tot} = \underbrace{A \times V_p}_{\text{Vent. Principal}} + \underbrace{B \times V_{recir}}_{\text{Vent. Recirculação}} + \underbrace{C \times V_p \cdot V_{recir}}_{\text{Competição}} \quad (5.3)$$

Tendo presente que todos os valores experimentais apresentados nas Figuras 5.4(a), 5.5(a) e 5.6(a) estão directamente ligados aos valores experimentais de velocidade média apresentados na Figura 5.7, estes foram obtidos através de medições feitas por um tubo de Pitot, conforme se apresentará em detalhe na Secção 5.3.1.

5.1.2 Perdas de pressão

A Figura 5.8 apresenta as quedas de pressão nas várias zonas do sistema. Apresenta-se a queda de pressão total do sistema, a queda de pressão no ciclone e a queda de pressão no recirculador, todas estas em função da velocidade de entrada no ciclone. Como era expectável, a queda de pressão nos vários componentes dos sistema aumenta conforme se aumenta a velocidade de entrada do gás, de uma forma não linear.

Em termos de modelos de previsão das quedas de pressão em cada zona em função da velocidade de entrada do gás, os modelos de ajuste usados foram modelos de potência, sendo de destacar que para os três casos, o modelo (conforme a equação 5.4) ajusta razoavelmente bem os pontos experimentais.

$$\Delta P = A \times (U_{in})^B \quad (5.4)$$

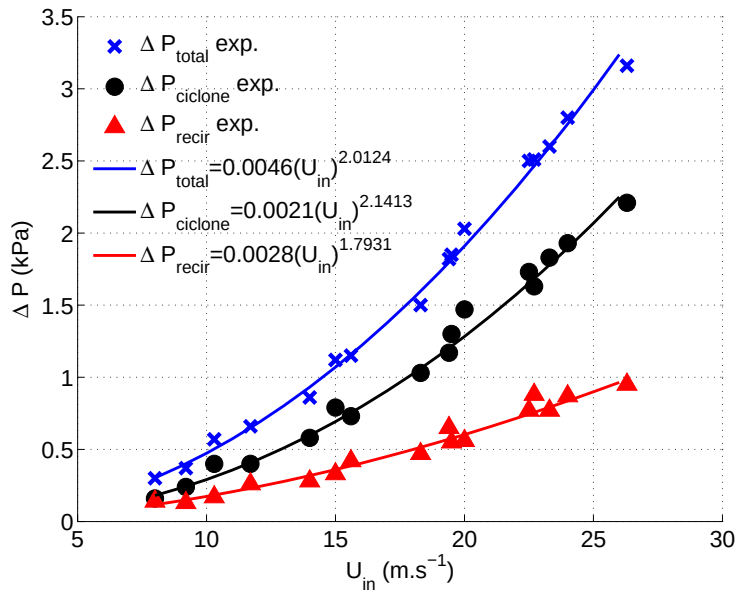


Figura 5.8 Quedas de pressão (total, ciclone e recirculador) em função da velocidade à entrada do ciclone

5.1.3 Caracterização do alimentador

Para estudar a performance do sistema à escala piloto, é necessário acoplar a este um alimentador de poeiras de forma a aerosolizar quantidades controladas de pó. Este facto não acontece nas instalações industriais, uma vez que as correntes à entrada do ciclone já têm dispersas as poeiras que se querem remover.

Focando no alimentador usado nesta instalação, este é um TOPAS 410G[®], sendo apresentado na Figura 5.9 um esquema deste.

Segundo o fabricante deste tipo de equipamento (TOPAS, 2009) os princípios por trás do seu funcionamento passam pela alimentação que é garantida por um tapete em baixo relevo com segmentos de dimensão reprodutível. Este tapete tem a capacidade de alimentar desde elevadas quantidades de pó (> 1kg/h de pó) até muito baixas quantidade de pó (< 50g/h de pó), sendo que a alimentação é controlada através da variação da velocidade linear do tapete.

O enchimento dos segmentos do tapete é feito por um raspador, que está presente no fundo do depósito do pó que é alimentado. O desenho deste raspador permite um doseamento constante de pó sendo que este é praticamente independente da altura de pó presente no reservatório, permitindo ainda que se encha o reservatório de forma

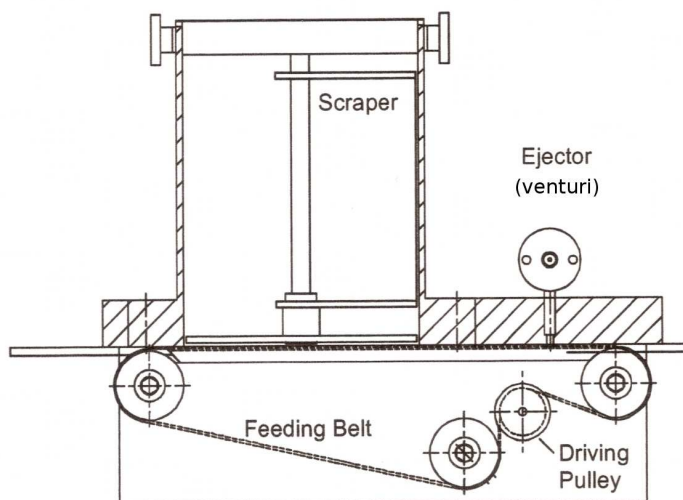


Figura 5.9 Esquema do alimentador usado na instalação piloto (TOPAS, 2009)

intermitente sem impacto significativo na concentração de aerossol gerada.

A unidade de dispersão consiste num bocal com dupla entrada, onde uma está conectada ao tapete que transporta o pó para aerosolizar e a outra está conectada a uma instalação de ar comprimido. Para concluir esta breve descrição, as forças tangenciais geradas no bocal, devido à sua configuração geométrica (tipo *venturi*), permitem que o pó se disperse de uma forma homogênea e uniforme.

Tendo presentes os princípios enunciados anteriormente, e no sentido de caracterizar o alimentador, pretende-se mostrar a capacidade de alimentação em termos de volume de pó a alimentar pelo equipamento. Considera-se que a base de cálculo que melhor representa a escala do alimentador é a velocidade linear do tapete que transporta o pó até ao ponto onde este é aerosolizado através da sua mistura com um caudal mássico de ar, sendo que a velocidade do tapete é regulada por um motor de velocidade variável. Em termos de caudais alimentados, foram feitas medidas do caudal mássico de pó debitado pelo equipamento fazendo um cruzamento de informações obtidas a partir de diversos pós e diversas percentagens de velocidade linear de transporte do alimentador.

De forma a tornar comparáveis pós com diferentes massas volúmicas, foi feita a conversão da massa de cada um dos pós, no seu correspondente volume e por fim foi feita uma média das várias medições para cada um dos pós analisados. Para este cálculo considerou-se válida a massa volúmica real do pó alimentado.

A Figura 5.10 apresenta o caudal volúmico horário de partículas (eixo dos yy em cm^3/h) vs. a percentagem de capacidade do alimentador usada (eixo dos xx).

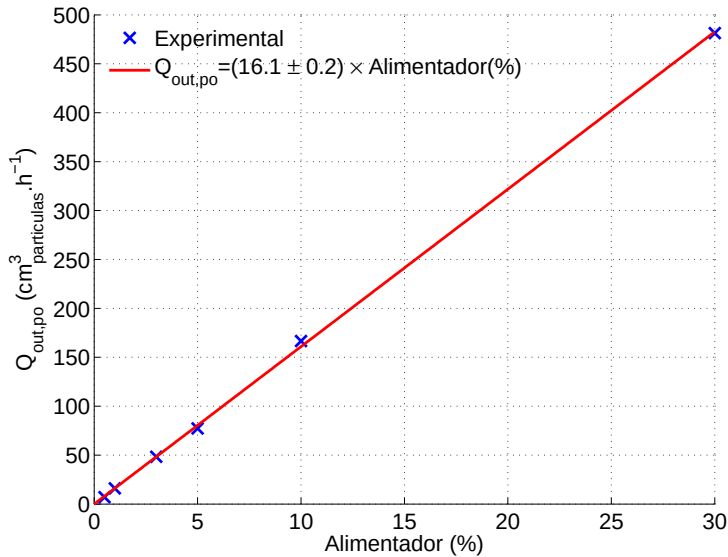


Figura 5.10 Caudal volúmico de partículas em função da percentagem de alimentação

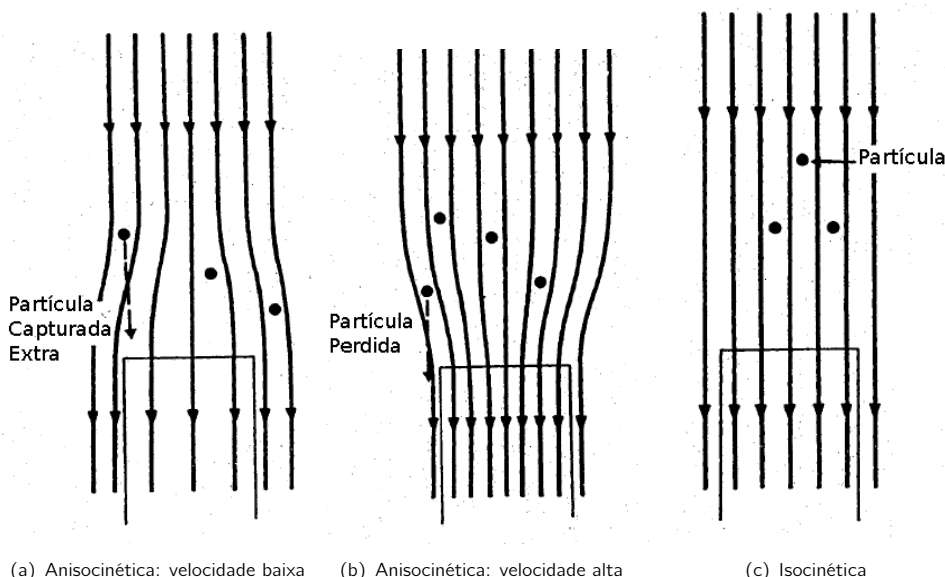
Foram feitos dois ajustes lineares (um que minimiza a soma do quadrado dos erros e outro que considera ainda que a ordenada na origem é zero) e ambos mostram que para o domínio usado neste trabalho (de 0.5% a 30% de capacidade de alimentação) que o alimentador é linear e reproduzível, uma vez que nesta Figura 5.10 está agrupada nos pontos apresentados informação de mais de 20 medições, com pós com densidades reais entre $\approx 1000\text{kg}/\text{m}^3$ e $\approx 4000\text{kg}/\text{m}^3$.

Esta correlação com a densidade real é possível pois os diferentes pós devem estar compactados no tapete transportador essencialmente com a mesma porosidade inter-particular.

5.2 Condições de amostragem

Nos sistemas em que são feitas recolhas de amostras gasosas, um dos princípios a levar em linha de conta aquando da amostragem, é que a presença da sonda não deve perturbar o campo de velocidade existente na zona onde é feita a amostragem. Quando isto é garantido, diz-se que a amostragem foi feita em condições isocinéticas.

A amostragem isocinética é uma técnica de captura de partículas suspensas no ar, que tem eficiência de captura unitária para todos os diâmetros de partículas no ar amostrado, independentemente da velocidade dos gases. A corrente gasosa que entra no colector tem uma velocidade (magnitude e direcção) igual à corrente gasosa a jusante da zona da amostragem do colector.



(a) Anisocinética: velocidade baixa

(b) Anisocinética: velocidade alta

(c) Isocinética

Figura 5.11 Vários tipos de amostragem de correntes gasosas (adaptado de Strauss (1975))

A Figura 5.11 pretende representar os vários tipos de amostragem gasosa possíveis, sendo apresentada na Figura 5.11(c) um exemplo de uma amostragem isocinética.

Focando nos casos em que não se obtém condições de amostragem isocinéticas, é apresentado na Figura 5.11(a) o caso onde a velocidade de amostragem é inferior ao que devia ser para condições de isocinetismo, sendo que uma das consequências deste tipo de amostragem é o facto das partículas menores serem amostradas com eficiências inferiores a 1, o que leva a um desvio do diâmetro médio da amostra para as partículas maiores, estimando por excesso a concentração de partículas no gás.

Por outro lado, a Figura 5.11(b) apresenta o caso onde a velocidade de amostragem é maior do que o pretendido para garantir as condições de isocinetismo, levando a que a concentração de partículas no gás seja estimada por defeito, causando o desvio do diâmetro médio da amostra para as partículas mais pequenas, estimando por defeito a concentração de partículas no gás (Hoffmann e Stein, 2002).

Tendo presentes os princípios genéricos aplicáveis na amostragem já enunciados, no sistema estudado neste trabalho são efectuados dois tipos de amostragem, que dever-se-ão aproximar o mais possível de amostragens isocinéticas, de forma a que se minimizem os erros de amostragem. Aceita-se isocinetismo quando a velocidade média da amostragem está entre 90% e 110% da velocidade dos gases no ponto de amostragem.

Os dois tipos de amostragem envolvidos no sistema são: a amostragem *online* (feita pelo equipamento GRIMM, que é um granulómetro laser *online* de 16 canais) e a amostragem *offline* (feita através de sondas isocinéticas com porta-filtros acopladas a uma bomba de vácuo de débito constante e regulável). Considerando que o objectivo de ambas as amostragens é permitir descrever quantitativamente e qualitativamente o gás que entra e sai do sistema, estas têm condicionantes distintas, que passarão a ser apresentadas de seguida.

Amostragem online - GRIMM

Considerando inicialmente as condições de amostragem *online*, a principal restrição desta é que o equipamento usado tem um volume de amostragem constante, o que implica que para que se consiga traduzir isocineticamente o sistema, o diâmetro do bocal da sonda deve variar em função do caudal que dá entrada no sistema.

Os diâmetros de sonda disponíveis e as respectivas gamas de velocidade para amostragem isocinética são apresentadas na Tabela 5.1, sendo que estes dados são fornecidos pelo fabricante.

Tabela 5.1 Diâmetros do bocal da sonda do GRIMM e respectivas gamas de velocidade

Diâmetro (mm)	Gama de velocidades (m/s)
1.0	[16 – 25[
1.5	[8 – 16[
2.0	[4 – 8[
3.0	[2 – 4[

Considerando o diâmetro de sonda como se se tratasse de uma variável contínua, este é dado pela Figura 5.12 em função do caudal volúmico horário, sendo ainda identificadas algumas das configurações base de várias condições de operação do sistema, que são referenciadas pelas frequências dos ventiladores para cada caso.

Em relação à função contínua apresentada, esta foi obtida através de um ajuste sob a forma de potência, e este foi obtido considerando os diâmetros de sonda existentes

(1.0 mm, 1.5 mm, 2 mm e 3 mm) e que a velocidade central da gama de velocidades apresentada para cada diâmetro de sonda, corresponde à velocidade no centro da tubagem onde é feita a amostragem. A informação retirada desta Figura deve ser combinada com a informação apresentada na Figura 5.5(a), de forma a garantir que os resultados do GRIMM são obtidos de uma forma o mais isocinética possível.

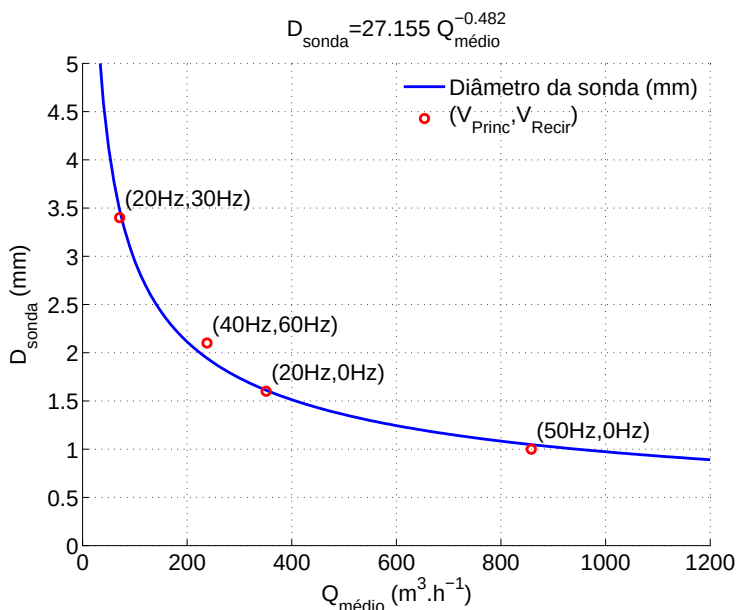


Figura 5.12 Diâmetro de sonda para o GRIMM em função do caudal volumétrico

Analisando a Figura 5.12, torna-se evidente os cuidados que são necessários para garantir que a amostragem feita pelo GRIMM seja isocinética, uma vez que no domínio dos caudais usados, as sondas a usar variam entre a menor e a maior disponíveis.

Ainda assim, é de destacar que, devido a restrições em termos das dimensões do bocal da sonda, há casos em que é impossível obter um bom isocinetismo com a sonda do GRIMM. Exemplo deste tipo de casos é o realizado com o ventilador principal a operar a 20 Hz e o ventilador de recirculação a 30 Hz, uma vez que estes ensaios só podem ser realizados com a sonda de 3 mm e para obter isocinetismo exigir-se-ia uma sonda de $\approx 3.5\text{mm}$, havendo por isso erro de amostragem do GRIMM.

No entanto, este caso é uma exceção, uma vez que para a maioria dos casos é possível obter condições de amostragem próximas das isocinéticas com os diâmetros de sondas disponíveis. Exemplos disso são os casos com o ventilador principal a operar a

40 Hz e o ventilador de recirculação a 60 Hz, ou apenas com o ventilador principal a operar a 20 Hz ou a 50 Hz, sendo que estes casos implicam velocidades de entrada substancialmente diferentes.

Amostragem offline - Sondas acopladas com porta-filtros acoplados a bombas de vácuo

Para o caso da amostragem para análise *offline*, embora existam restrições semelhantes às da amostragem *online* ao nível dos diâmetros dos bocais das sondas, como estas estão acopladas a uma bomba de vácuo, é possível fazer um controlo rigoroso do caudal aspirado em função do diâmetro do bocal adoptado, sendo possível obter uma amostragem isocinética.

Assim, para estas sondas, os diâmetros dos bocais disponíveis são 3, 4, 5 e 6 mm.

Como já referido anteriormente, a bomba de vácuo (Techora Bravo® modelo Basic) tem ajuste de caudal aspirado, mas no sentido de tornar o caudal aspirado mais estável, é de interesse que a bomba trabalhe a um caudal de aspiração na gama de 10 a 20 L/min, ainda que esta consiga aspirar quer valores mais baixos ou mais elevados de caudal.

Assim sendo, tendo em conta que as velocidades na tubagem à entrada e à saída variam entre os $\approx 2\text{m/s}$ (caso com o ventilador principal a operar a 20Hz e o ventilador de recirculação a 30Hz) e os $\approx 30\text{m/s}$ (caso com o ventilador principal a operar isoladamente a 60Hz), em função deste valor é escolhida a sonda adequada para fazer a amostragem isocinética, sendo que para este tipo de amostragem, ao contrário da sonda do GRIMM, não é possível generalizar as condições de amostragem para cada um dos diâmetros do bocal da sonda, uma vez neste caso, o isocinetismo é obtido combinando o caudal aspirado pela bomba de vácuo com as dimensões do bocal da sonda.

Como exemplo, considerando um caso em que o ventilador principal opera isoladamente a 30 Hz, é possível conseguir isocinetismo para uma sonda de 4 mm com caudal aspirado de 11 L/min ou com um sonda de 5 mm com um caudal aspirado de 17 L/min.

5.3 Processamento de resultados

O processamento dos resultados da amostragem é feito em várias etapas. Começa-se por analisar os resultados da amostragem isocinética, para determinar com rigor as concentrações e caudais em cada uma das zonas do sistema. Em seguida, faz-se uma breve análise dos resultados em bruto do GRIMM (amostragem *online*), sendo posteriormente corrigidos pelos valores obtidos na amostragem isocinética após análise *offline*, calculando-se a eficiência global do sistema.

Posteriormente é feita uma análise dos resultados das distribuições que dão entrada e saída do sistema, usando para isso o granulómetro laser COULTER LS 230[®] e para terminar constroem-se as curvas de eficiência fraccional considerando as duas situações possíveis: usando os dados do GRIMM ou usando os dados do COULTER.

Cada um dos pontos referidos será evidenciado em detalhe seguidamente.

5.3.1 Considerações acerca do isocinetismo

Uma das principais razões para efectuar a amostragem isocinética (com as sondas acopladas a bombas de vácuo) da entrada e saída do sistema é a capacidade de medição com rigor da concentração à entrada e saída do sistema, sendo esta uma das variáveis normalmente conhecida na indústria. Por exemplo, cruzando a produção horária com o caudal de ar que dá entrada no ciclone, é possível estimar a concentração que dá entrada no sistema.

Como já ficou evidente na Figura 4.21, a concentração é de facto uma variável com muito impacto nas previsões do modelo PACyc e este comportamento traduz de facto o que se passa na realidade, desde o nível laboratorial, passando pela escala piloto até à escala industrial.

Assim sendo, no sentido de obter resultados com elevada reprodutibilidade e representatividade das condições experimentais, nesta amostragem isocinética são consistentemente registadas as variáveis com impacto na performance da amostragem. Estas são: a temperatura ambiente, a temperatura do medidor, a pressão ambiente, a pressão absoluta na conduta, as perdas de pressão no sistema (total e ciclone) e a humidade ambiente. Levando estas informações em linha de conta, é feita uma medição e correcção do caudal aspirado (que não só é função do diâmetro de sonda mas também das condições atmosféricas) em intervalos de tempo definidos à partida e com os resultados finais é possível traçar o perfil de velocidade e compará-lo com a velocidade média de aspiração.

Com o tempo de amostragem e a velocidade média de amostragem, é obtido o caudal mássico de ar aspirado e tendo presentes as condições de pressão e temperatura no medidor é possível obter o caudal volúmico de ar.

A Figura 5.13(a) pretende apresentar esquematicamente a geometria da sonda isocinética.

Estudando em maior detalhe a geometria do conjunto sonda-filtro, é possível identificar zonas com potenciais perdas de massa, como por exemplo, a sonda em si (caso se esta não for correctamente lavada) ou a ligação da base do porta filtros à parte que a co-

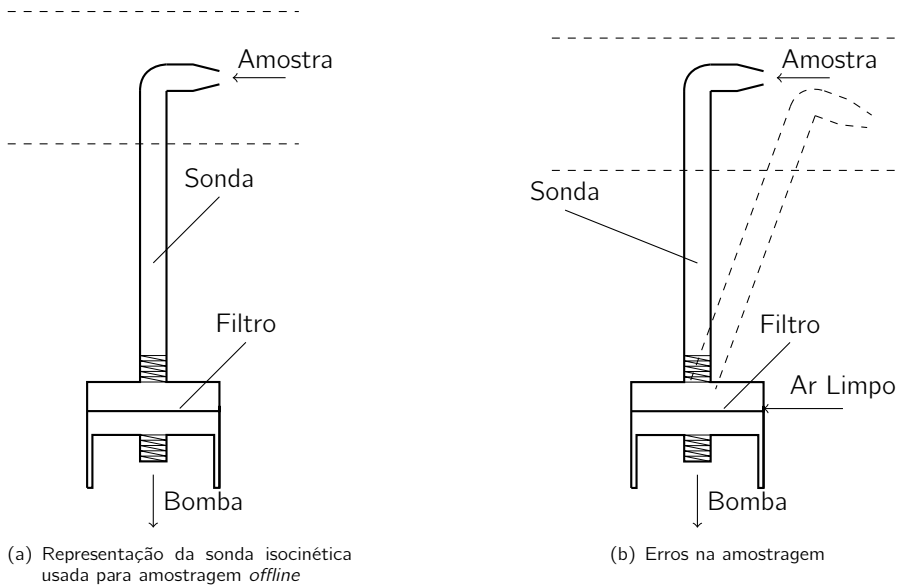


Figura 5.13 Equipamento usado para amostragem isocinética

necta com a sonda. Assim sendo, na Figura 5.13(b) apresentam-se alguns dos possíveis erros de amostragem: a sonda não estar centrada na tubagem (não correspondendo por isso a velocidade de amostragem à do centro da tubagem), estar inclinada relativamente ao eixo da conduta (aceitam-se inclinações de $\pm 15^\circ$) e/ou a diluição da amostra, com a entrada de ar atmosférico para a zona do filtro.

Caracterização do sistema

Encetando a análise dos procedimentos a ter em cada ensaio experimental, para o cálculo da densidade do ar (que foi o fluído em todos os ensaios realizados neste trabalho), é considerada a composição média deste, em termos dos seus três principais componentes: oxigénio (O_2), azoto (N_2) e água (H_2O). Em função da humidade relativa, pressão e temperatura, e recorrendo a uma carta psicrométrica é estabelecida a percentagem molar de água existente no ar. Tendo em conta esta última, é definida a massa molar média do ar ($\overline{M}$), através da equação 5.5.

$$\overline{M} = \%O_2 \times M_{O_2} + \%H_2O \times M_{H_2O} + (100\% - \%O_2 - \%H_2O) \times M_{N_2} \quad (5.5)$$

Neste ponto é introduzida a simplificação de considerar o ar com um gás perfeito,

em vez de o considerar um gás real, uma vez que para as condições de operação usuais, o ar se comporta de uma forma muito semelhante a um gás perfeito. Usando a equação 5.6, calcula-se a massa volúmica do ar (ρ), considerando as condições operatórias já referidas.

$$\rho = \frac{P_{abs} \overline{M}}{RT} \quad (5.6)$$

Em relação à determinação rigorosa dos caudais em cada uma das zonas do sistema, foram efectuadas medições do perfil de velocidades usando um tubo de Pitot. Segundo Foust et al. (1960), este tipo de equipamento permite medir a velocidade de um fluido num ponto e é normalmente constituído por dois tubos concêntricos, em que o tubo exterior tem pequenos orifícios perpendiculares ao escoamento.

Ainda que não haja movimento de fluido dentro do tubo de Pitot, estabelece-se uma diferença de pressão entre o tubo exterior (pressão estática) e o tubo interior (pressão estática e dinâmica) e recorrendo à equação de Bernoulli é possível estabelecer que a velocidade do fluido é dada pela equação 5.7.

$$U(r) = C_P \sqrt{\frac{2 \Delta P(r)}{\rho}} \quad (5.7)$$

O coeficiente C_P é unitário para um tubo de Pitot que tenha arrasto praticamente nulo no fluido onde está inserido. Estes tubos são designados por tipo Prandtl.

Particularizando para o caso em estudo neste trabalho, o tubo de Pitot usado (Testo® 400) para além de devolver o valor de diferença de pressão dinâmica e estática (ΔP), tinha ainda programada uma fórmula de cálculo da velocidade do gás¹ que levou a resultados de velocidade muito próximos dos estimados usando a leitura directa da diferença de pressão.

Independentemente da fórmula usada para calcular a velocidade num dado ponto, para obter a velocidade média numa tubagem, é necessário uma amostragem radial ponto-a-ponto. Considerando uma tubagem de secção circular, a velocidade média é definida pela equação 5.8,

$$\overline{U} = \frac{Q}{\pi R^2} \quad (5.8)$$

¹Os resultados de velocidade calculados pelo tubo de Pitot (Testo® 400) são referidas como U^* e as operações usando este valor de velocidade são identificadas por um asterisco.

onde Q é o caudal volúmico de fluído e R é o raio da tubagem. O caudal volúmico total é dado pela expressão 5.9,

$$Q = \int_0^R 2\pi r U(r) dr \quad (5.9)$$

sendo possível determinar a velocidade média pela equação 5.10.

$$\bar{U} = \frac{\int_0^R 2r U(r) dr}{R^2} \quad (5.10)$$

Usando o valor médio do caudal volúmico (entre Q e Q^*), é possível calcular o caudal mássico médio de ar ($\bar{W}$), usando a equação 5.11.

$$\bar{W} = \bar{Q} \rho \quad (5.11)$$

Por fim, e no sentido de corrigir os caudais volúnicos para condições comparáveis à entrada e à saída, foram levadas em linha de conta as respectivas condições de temperatura, pressão e humidade. As equações 5.12 e 5.13 traduzem a correcção para condições de ar seco às condições de pressão e temperatura normais (PTN), sendo que os caudais ($Q^{*,'}$ e Q') é possível calcular a concentração de pó à entrada e à saída às mesmas condições.

$$Q^{*,'} = Q^* \frac{273.15}{273.15 + T(^{\circ}\text{C})} \frac{P_{abs}}{1013.25} \frac{(100\% - \%Hum)}{100\%} \quad (5.12)$$

$$Q' = Q \frac{273.15}{273.15 + T(^{\circ}\text{C})} \frac{P_{abs}}{1013.25} \frac{(100\% - \%Hum)}{100\%} \quad (5.13)$$

Caracterização da amostragem

Sabendo que o posicionamento radial da sonda determina a qualidade da amostragem e que as velocidades do fluído são função da posição radial, é de particular interesse saber qual o caudal a ser amostrado pela sonda em função da posição radial desta de forma a ter uma amostragem isocinética. Este caudal, às condições de pressão, temperatura e humidade dentro da tubagem é dado pela equação 5.14, onde $U(r)$ é o valor da velocidade pontual para a respectiva posição radial.

$$Q_{sonda}(r) = \frac{\pi D_{sonda}^2}{4} U(r) \quad (5.14)$$

Tendo presente que a amostragem é controlada por uma bomba de vácuo acoplada às sondas isocinéticas, no sentido de garantir que o caudal amostrado pelo medidor às respectivas condições de pressão, temperatura e humidade equivale a uma amostragem isocinética dentro da tubagem às respectivas condições operatórias, é necessário efectuar a correcção conforme se apresenta na equação 5.15. Esta correcção leva em consideração o local da sonda, isto é, se esta está à entrada ou saída do sistema, uma vez que se esta estiver à entrada do sistema, está em depressão e caso esteja à saída está em compressão.

$$Q'_{sonda}(r) = Q_{sonda}(r) \frac{273.15 + \overline{T_{med}(\text{°C})}}{273.15 + \overline{T(\text{°C})}} \frac{P_{abs}}{P_{atm}} \frac{(100\% - \%Hum)}{100\%} \quad (5.15)$$

Levando em linha de conta o posicionamento central da sonda, o tempo de amostragem ($t_{amostragem}$) e o valor do caudal a amostrar às condições do medidor (Q'_{sonda}), calcula-se o volume a amostrar ($V_{amostrar}$) para obter uma amostragem isocinética, conforme a equação 5.16.

$$V_{amostrar} = Q'_{sonda} \times t_{amostragem} \quad (5.16)$$

Após a realização do ensaio, divide-se o volume efectivamente amostrado ($V_{amostrado}$) pelo tempo de amostragem, corrigindo-o para as condições da tubagem onde é feita amostragem, obtendo o caudal amostrado ($Q'_{amostrado}$) como enunciado na equação 5.17.

$$Q'_{amostrado} = \frac{V_{amostrado}}{t_{amostragem}} \frac{273.15 + \overline{T(\text{°C})}}{273.15 + \overline{T_{med}(\text{°C})}} \frac{P_{atm}}{P_{abs}} \frac{100\%}{(100\% - \%Hum)} \quad (5.17)$$

Combinação da informação do sistema e da amostragem

Sabendo o caudal de gás amostrado, para calcular o caudal mássico de pó que entra e sai do sistema, é feita a pesagem da massa de pó colectada no filtro (m_{filtro}) e a massa de pó que fica na sonda (m_{sonda}). Com estes valores divididos pelo tempo de amostragem é possível obter o caudal mássico de pó (W_p), como apresenta a equação 5.18.

$$W_p = \frac{m_{filtro} + m_{sonda}}{t_{amostragem}} \quad (5.18)$$

Partindo deste valor e dividindo o caudal amostrado, é obtida a concentração em cada uma das zonas através da equação 5.19.

$$C_p = \frac{W_p}{Q'_{amostrado}} \quad (5.19)$$

Sendo este o resultado utilizado para calibração dos espectrómetros laser GRIMM, em seguida é feito o processamento de resultados das amostragens *online* e *offline* considerando os valores de caudal mássico de pó à entrada e à saída do sistema.

5.3.2 Particularidades dos resultados da amostragem online

Como já referido atrás, a amostragem *online* é realizada usando dois granulómetros laser GRIMM 1.108. Uma das formas de saída dos resultados dos granulómetros é a concentração média final de cada um dos diâmetros.

Para obter a concentração, o amostragem é feita levando em linha de conta as seguintes premissas:

- A amostragem é feita em número de partículas/litro por canal e com um período de 6 segundos;
- É feita uma transformação para massa de partículas de modo a levar em linha de conta as respectivas massas volúmicas, usando para isso um factor (C) que multiplica os resultados finais de concentração;

5.3.3 Combinação dos resultados de amostragem online com os da amostragem offline

Focando a amostragem *online*, uma das formas dos resultados directo do GRIMM é a concentração (em $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de cada uma das classes de leitura. O equipamento tem a capacidade de ler 16 classes, em que a mais pequena são as partículas com diâmetros $< 0.30\mu\text{m}$ (tendo no entanto a limitação de não detectar partículas com diâmetros inferiores a $0.23\mu\text{m}$) e que a maior são as partículas com diâmetros $> 20\mu\text{m}$ e entre estas é criado uma sequência de classes em escala logarítmica, isto é, para as classes de diâmetros menores, o intervalo entre o diâmetro menor e o maior pertencentes a

essa classe é também menor. Por omissão, para o modelo PACyc, estas são as classes que são usadas para descrever as distribuições, embora haja, quando pertinente, casos excepcionais em que se incluem outros diâmetros.

Sabe-se que por limitação do equipamento, a sua capacidade de medida é muito afectada para concentrações acima dos 100 mg/m³. Levando em linha de conta que existem meios para fazer a análise *offline* simultânea quer à entrada quer à saída do sistema, a medição *online* não é feita à entrada para casos onde a concentração ultrapasse substancialmente a concentração referida, por duas razões distintas:

- Os resultados da medição serão sempre por defeito;
- Existe o risco efectivo de danificar o equipamento;

Esta limitação é uma das razões para haver medição *offline* das entradas e saída do sistema, uma vez que com este tipo de amostragem é possível contornar este problema. Além desta razão, já foi referido anteriormente esta permitir obter resultados quantitativamente mais precisos.

Em termos de análise das amostras obtidas pela amostragem *offline*, estas amostras são dispersas num agente de dispersão conveniente (água destilada, etanol, acetona, etc.) e em seguida são sujeitas a ultra-sons para formar uma suspensão uniforme das partículas, no meio de dispersão.

Em seguida, é feita a medição da granulometria (distribuição de tamanho de partículas, área específica, etc.) das amostras usando o granulómetro Beckman Coulter LS 230® (BECKMAN, 2009).

Este equipamento consiste em três partes fundamentais: o sensor, a célula de amostragem e o amostrador. A detecção de partículas é feita usando um díodo fotossensível, que gera impulsos eléctricos de amplitude variável quando alguma das partículas presentes na célula de amostragem difracta o feixe de luz gerado pelo equipamento. O tamanho das partículas está correlacionado com a proporcionalidade entre amplitude dos impulsos eléctricos, sendo que a partir destas são determinadas as fracções numéricas de cada diâmetro de partículas (Koscielniak e Sloan, 1999; Swift, 2000). Os resultados obtidos a partir dos dados de difracção são calculados através dos modelos ópticos de Fraunhofer (1973) ou de Mie (1908).

Aprofundando um pouco mais este modelo, é necessário ter presente que este método de medida por difracção laser apenas apresenta bons resultados para gamas entre 0.4 e 2000 µm, tendo presente que a qualidade destes é função das propriedades ópticas do material, em particular, da absorção de luz e do índice de refracção do meio e das partículas sólidas. No entanto, para medir correctamente a fracção de partículas

entre os diâmetros 0.04 a 0.4 μm , o Beckman Coulter LS 230 aplica uma técnica patenteada para a caracterização de partículas de dimensões inferiores a 1 μm (**PIDS** - *Polarisation Intensity Differential Scattering* (COULTER, 2009)). Esta técnica permite que o equipamento consiga bons resultados para partículas com diâmetros até 0.04 μm .

Tendo contextualizado os princípios por trás dos equipamentos usados para análise experimental do sistema à escala piloto, apresenta-se um exemplo de cálculo da eficiência experimental.

5.4 Exemplos de cálculo da eficiência experimental

Nesta secção são apresentados, a título de exemplo, os cálculos das eficiências globais e fraccionais para um dado caso de estudo.

Um processo que interliga todos os resultados experimentais, é o resultado da amostragem isocinética, no sentido de determinar a concentração à entrada e à saída. Apresenta-se assim o exemplo de cálculo da isocinética à entrada para o caso estudado.

Em termos de cálculo de eficiências, a eficiência global do sistema é possível de determinar de duas formas distintas (ainda que naturalmente interdependentes), e com esta é possível construir duas curvas de eficiência fraccional diferentes:

1. GRIMM à entrada vs. GRIMM à saída: resulta dos valores do GRIMM corrigidos após amostragem isocinética, isto é, considerando válidos os valores da massa à entrada e à saída calculados após amostragem isocinética, usa-se a distribuição mássica obtida através do GRIMM à entrada a muito baixa concentração e a distribuição do GRIMM à saída à concentração a que se realizou o ensaio para calcular a curva de eficiência fraccional;
2. COULTER à entrada vs. COULTER à saída: resultam dos valores do COULTER após amostragem isocinética, isto é, à semelhança do caso GRIMM à entrada vs. GRIMM à saída, usam-se os valores da isocinética para determinar a massa à entrada e à saída do sistema, usando-se neste caso as distribuições obtidas pelo Coulter à entrada e à saída para determinar a curva de eficiência fraccional;

A descrição detalhada dos cálculos por trás de cada uma das diferentes abordagens será feita adiante, assim como uma justificação mais detalhada dos processos simplificados para cada caso, começando por evidenciar o processamento dos dados acerca da amostragem isocinética.

5.4.1 Isocinética (à entrada)

O cálculo da concentração à entrada e à saída do sistema são feitos usando as equações apresentadas na Secção 5.3.1. Seguindo a estrutura apresentada, destaca-se que a experiência apresentada para exemplo de cálculo foi realizada às seguintes condições, sendo que o exemplo de cálculo apresentado é da análise do isocinetismo à entrada.

- temperatura ambiente média, $\overline{T} = 22.0^{\circ}\text{C}$;
- temperatura do medidor média, $\overline{T}_{med} = 23.6^{\circ}\text{C}$;
- pressão atmosférica, $P_{atm} = 1007.92\text{mbar}$;
- pressão na toma da entrada, $P_{abs} = 1000.64\text{mbar}$;
- humidade atmosférica (em volume), $\%H_2O = 1.58\%$;
- sonda isocinética à entrada e à saída colocadas no ponto central e com diâmetro do bocal da sonda, $D_{sonda} = 4\text{mm}$;

Tendo em conta a constituição do fluido, é definida a massa molecular média do ar, através da equação 5.20.

$$\begin{aligned}\overline{M} &= \%O_2 \times M_{O_2} + \%H_2O \times M_{H_2O} + (100\% - \%O_2 - \%H_2O) \times M_{N_2} \\ &= 21\% \times 32 + 1.58\% \times 18 + (100\% - 21\% - 1.58\%) \times 28 \\ &\approx 28.68\text{g/mol}\end{aligned}\quad (5.20)$$

Usando a equação 5.21, calcula-se a massa volúmica do ar.

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{P_{abs} \overline{M}}{R \overline{T}} \\ &= \frac{1000.64 \times 28.68}{83.14 \times (273.15 + 22.0)} \\ &\approx 1.17\text{kg/m}^3\end{aligned}\quad (5.21)$$

As medições das perdas de pressão em função da posição radial para determinar o perfil de velocidades usando um tubo de Pitot são apresentados na Tabela 5.2, são ainda apresentados os valores de fórmula de cálculo da velocidade do gás embutido no equipamento usado.

Tabela 5.2 Determinação de um perfil de velocidades à entrada do sistema exemplo

$\frac{r}{R}$	ΔP (Pa)	v^* (m/s)	v (m/s)
-1.00	0	0.00	0.00
-0.88	182	17.63	17.64
-0.80	229	19.77	19.79
-0.64	265	21.25	21.29
-0.48	296	22.47	22.50
-0.32	318	23.31	23.32
-0.16	327	23.65	23.65
0.00	331	23.80	23.79
0.16	332	23.82	23.83
0.32	335	23.92	23.94
0.48	328	23.68	23.68
0.64	327	23.63	23.65
0.80	302	22.68	22.73
0.88	244	20.40	20.43
1.00	0	0.00	0.00

Usando o valor de diferença de pressão do ponto central e usando a equação de Bernoulli simplificada, foi calculada a velocidade do gás usando a equação 5.22.

$$\begin{aligned}
 U(0) &= \sqrt{\frac{2 \Delta P(0)}{\rho}} \\
 &= \sqrt{\frac{2 \times 331}{1.17}} \\
 &\approx 23.79 \text{ m/s}
 \end{aligned} \tag{5.22}$$

Com os valores de velocidade média ($\overline{U}^* = 19.37 \text{ m/s}$ e $\overline{U} = 19.39 \text{ m/s}$), através das equações 5.23 e 5.24 foram calculados os correspondentes caudais volúnicos de gás.

$$\begin{aligned}
Q^* &= \overline{U}^* \times \frac{\pi D^2}{4} \\
&= 19.37 \times \frac{\pi \times 0.125^2}{4} \times 3600 \\
&\approx 856 \text{m}^3/\text{h}
\end{aligned} \tag{5.23}$$

$$\begin{aligned}
Q &= \overline{U} \times \frac{\pi D^2}{4} \\
&= 19.39 \times \frac{\pi \times 0.125^2}{4} \times 3600 \\
&\approx 857 \text{m}^3/\text{h}
\end{aligned} \tag{5.24}$$

Usando o valor médio do caudal volúmico (entre Q e Q^* , $\overline{Q} = 856.5 \text{m}^3/\text{h}$), e que após multiplicar pela massa volúmica do ar, obtém-se o caudal mássico médio de ar ($\overline{W}$), através da equação 5.25.

$$\begin{aligned}
\overline{W} &= \overline{Q} \times \rho \\
&= 856.5 \times 1.17 \\
&\approx 1002 \text{kg/h}
\end{aligned} \tag{5.25}$$

Os caudais volúnicos corrigidos para as condições PTN e em base seca são traduzidos pelas equações 5.26 e 5.27.

$$\begin{aligned}
Q^{*,'} &= Q^* \times \frac{273.15}{273.15 + \overline{T}(\text{°C})} \times \frac{P_{abs}}{1013.25} \times \frac{(100\% - Hum\%)}{100\%} \\
&= 856 \times \frac{273.15}{273.15 + 22.0} \times \frac{1000.64}{1013.25} \times \frac{(100\% - 1.58\%)}{100\%} \\
&\approx 770 \text{Nm}^3/\text{h}
\end{aligned} \tag{5.26}$$

$$\begin{aligned}
Q' &= Q \times \frac{273.15}{273.15 + \overline{T}(\text{°C})} \times \frac{P_{abs}}{1013.25} \times \frac{(100\% - Hum\%)}{100\%} \\
&= 857 \times \frac{273.15}{273.15 + 22.0} \times \frac{1000.64}{1013.25} \times \frac{(100\% - 1.58\%)}{100\%} \\
&\approx 771 \text{Nm}^3/\text{h}
\end{aligned} \tag{5.27}$$

O caudal amostrado pela sonda na posição central é dado pela equação 5.28,

Tabela 5.3 Caudal amostrado pela sonda isocinética em função da posição radial

$\frac{r}{R}$	$Q_{sonda}(\text{L/min})$	$Q'_{sonda}(\text{L/min})$
-1.00	0	0
-0.88	13.30	13.07
-0.80	14.92	14.66
-0.64	16.05	15.77
-0.48	16.96	16.67
-0.32	17.58	17.28
-0.16	17.83	17.52
0.00	17.94	17.63
0.16	17.97	17.65
0.32	18.05	17.73
0.48	17.86	17.55
0.64	17.83	17.52
0.80	17.14	16.84
0.88	15.40	15.13
1.00	0.00	0.00

$$\begin{aligned}
 Q_{sonda}(0) &= \frac{\pi \times D_{sonda}^2}{4} \times U(0) \times 60 \times 1000 \\
 &= \frac{\pi \times (4 \times 10^{-3})^2}{4} \times 23.79 \times 60 \times 1000 \\
 &\approx 17.94 \text{ L/min}
 \end{aligned} \tag{5.28}$$

e o caudal amostrado corrigido para que corresponda a uma amostragem isocinética dentro da tubagem é calculado pela equação 5.29.

$$\begin{aligned}
 Q'_{sonda}(0) &= Q_{sonda}(0) \times \frac{273.15 + \overline{T_{med}(\text{°C})}}{273.15 + \overline{T}(\text{°C})} \times \frac{P_{abs}}{P_{atm}} \times \frac{(100\% - \%Hum)}{100\%} \\
 &= 17.94 \times \frac{273.15 + 23.6}{273.15 + 22.0} \times \frac{1000.64}{1007.92} \times \frac{(100\% - 1.58\%)}{100\%} \\
 &\approx 17.62 \text{ L/min}
 \end{aligned} \tag{5.29}$$

O volume a amostrar ($V_{amostrar}$) para obter uma amostragem 100% isocinética é obtido através da equação 5.30, considerando que o caudal médio corrigido é obtido

apenas entre as posições radiais $-0.16\frac{r}{R}$ e $0.16\frac{r}{R}$, devido à incerteza da colocação exacta do bocal de amostragem.

$$\begin{aligned} V_{amostrar} &= \overline{Q'_{sonda}} \times t_{amostragem} \\ &= 17.60 \times 50 \\ &\approx 880L \end{aligned} \quad (5.30)$$

Após a amostragem, para determinar o caudal realmente amostrado e corrigido para as condições do medidor, usa-se a equação 5.31. Para o caso em estudo, o volume amostrado foi de 879.9 L.

$$\begin{aligned} Q'_{amostrado} &= \frac{V_{amostrado}}{t_{amostragem}} \times \frac{273.15 + \overline{T(^{\circ}C)}}{273.15 + \overline{T_{med}(^{\circ}C)}} \times \frac{P_{atm}}{P_{abs}} \times \frac{100\%}{(100\% - \%Hum)} \\ &= \frac{879.9 \times 10^{-3}}{50 \times 60} \times \frac{273.15 + 22.0}{273.15 + 23.62} \times \frac{1007.62}{1000.64} \times \frac{100\%}{(100\% - 1.58\%)} \\ &\approx 2.99 \times 10^{-4} m^3/s \end{aligned} \quad (5.31)$$

O caudal mássico de pó é calculado como se apresenta na equação 5.32.

$$\begin{aligned} W_p &= \frac{m_{filtro} + m_{sonda}}{t_{amostragem}} \\ &= \frac{40.8 + 9.9}{50 \times 60} \\ &\approx 1.69 \times 10^{-2} mg/s \end{aligned} \quad (5.32)$$

Por fim, a concentração é calculada através da equação 5.33.

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{W_p}{Q'_{amostrado}} \\ &= \frac{1.69 \times 10^{-2}}{2.99 \times 10^{-4}} \\ &\approx 56.5 mg/m^3 \end{aligned} \quad (5.33)$$

A Figura 5.14 apresenta a folha de cálculo equivalente aos exemplos de cálculo apresentados nesta Secção.



Figura 5.14 Folha de cálculo com o processamento de resultados da amostragem isocinética

5.4.2 Eficiência global

Para calcular a eficiência global, esta é calculada por um de dois métodos: considerando o caudal mássico horário de entrada e de saída de partículas ou considerando a concentração de entrada e de saída de partículas, desde que se garantam que as condições de pressão e temperatura sejam iguais à entrada e à saída do sistema.

Considerando o caso em que a eficiência global é determinada usando caudal mássico de partículas, este é determinado directamente através dos valores de caudal mássico de pó à entrada e à saída, sem que sejam necessárias quaisquer operações adicionais.

Na Tabela 5.4 apresenta-se o resultado da eficiência global do sistema, sendo esta apresentada em função do caudal mássico de pó e o respectivo exemplo de cálculo é apresentado na equação 5.34. Neste caso, as condições de pressão e temperatura não eram iguais à entrada e à saída, sendo por isso errado calcular a eficiência global do sistema usando directamente os valores de concentração, apresentando também a concentração às condições PTN e o correspondente exemplo de cálculo de eficiência na equação 5.35.

Tabela 5.4 Cálculo da eficiência global do sistema

Grandeza	GRIMM		GRIMM		Eficiência
	(dados em bruto)		(dados tratados)		
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	
Caudal mássico (µg/h)	41140	5985	48400	6300	86.98
Concentração (µg/m³)	48025	7030	56500	7400	-
Concentração (µg/Nm³)	-	-	62900	8190	86.98

$$\begin{aligned}
 \eta &= 1 - \frac{W_{p,out}}{W_{p,in}} \\
 &= \left(1 - \frac{6300}{48400}\right) \times 100 \\
 &\approx 86.98\%
 \end{aligned} \tag{5.34}$$

$$\begin{aligned}
 \eta &= 1 - \frac{C_{out}^{PTN}}{C_{in}^{PTN}} \\
 &= \left(1 - \frac{8190}{62900}\right) \times 100 \\
 &\approx 86.98\%
 \end{aligned} \tag{5.35}$$

A determinação dos caudais mássicos à entrada e saída do sistema assim como as respectivas concentrações serão apresentadas adiante.

5.4.3 Exemplo de cálculo GRIMM entrada vs. GRIMM saída

Todos os ensaios, seja qual for a configuração do sistema, isto é com ou sem recirculação, começam através de uma medição a muito baixa concentração (0.5% da capacidade do alimentador) de forma a estimar *online* a entrada no sistema, uma vez que como já foi referido, a elevadas concentrações o equipamento produz resultados por defeito.

Assim sendo, os dados em bruto da entrada são obtidos usando o GRIMM e ainda que saibamos as limitações do equipamento a mais elevadas concentrações, estes dados são considerados como a base para a obtenção das curvas de eficiência fraccional GRIMM entrada vs. GRIMM saída.

Em seguida, para obtenção dos resultados quantitativamente representativos, é feita uma amostragem isocinética com as sondas acopladas aos porta-filtros e às respectivas bombas de vácuo, e neste caso, mesmo se se tratar de um ensaio com o ciclone isolado, apenas se faz amostragem GRIMM à entrada a concentrações baixas ($< 100\text{mg/m}^3$), de forma a não danificar o equipamento.

Para o cálculo da curva de eficiência fraccional GRIMM entrada vs. GRIMM saída, é feita uma correcção dos dados obtidos em bruto, considerando válidos os valores de concentração à entrada e saída determinados pelas sondas isocinéticas. De facto, estes dados são mais fiáveis, até porque as respectivas sondas são lavadas e o resíduo pesado após cada experiência, ao contrário das sondas acopladas ao GRIMM.

Assim sendo, os valores do GRIMM (quer à entrada quer à saída) são apenas usados para determinar a proporção de cada diâmetro na entrada e na saída. Na Tabela 5.5 apresenta-se o processamento dos dados em bruto do GRIMM à entrada e à saída e através do quociente entre a entrada e a saída de cada diâmetro (usando os dados processados), é calculada a curva de eficiência fraccional GRIMM entrada vs. GRIMM saída.

Considerando como exemplo de cálculo, o diâmetro médio menor da distribuição ($0.265\mu\text{m}$), partindo dos dados em bruto, as equações 5.36 e 5.37 apresentam o tratamento de dados feito à entrada e à saída, onde G_{in}^P e G_{out}^P são os valores do GRIMM após processamento à entrada e à saída respectivamente e W_{in}^b e W_{out}^b são os valores do caudal mássico total obtido a partir das sondas isocinéticas.

Tabela 5.5 Processamento dos dados em bruto do GRIMM à entrada e à saída

	GRIMM (µg/m³)		GRIMM (µg/m³)		
Diâmetro	Concentração		Concentração		Eficiência
	(dados em bruto)		(dados tratados)		
(µm)	Entrada	Saída	Entrada	Saída	(%)
0.265	3327	2016	3914	2122	45.79
0.350	3109	1644	3658	1731	52.68
0.450	1867	650	2197	684	68.87
0.575	1078	373	1268	393	69.03
0.725	605	166	711	175	75.40
0.900	736	157	866	165	80.95
1.250	1069	166	1257	175	86.06
1.750	1230	115	1447	121	91.65
2.500	4573	261	5380	275	94.89
3.500	4946	152	5819	160	97.25
4.500	3339	109	3928	115	97.07
7.500	3000	122	3529	128	96.37
12.500	285	27	335	29	91.38
17.500	106	10	125	10	91.67
25.000	71	4	84	4	94.78
53.000	11798	12	13881	13	99.91
TOTAL (mg/h)	41140	5985	48400	6300	-
GLOBAL (%)	-	-	-	-	86.98

$$\begin{aligned} G_{in}^p &= G_{in}^b \times \frac{W_{in}}{\sum_{i=1}^n G_{in}^b} \\ &= 3327 \times \frac{48400}{41140} \\ &\approx 3914 \text{mg/m}^3 \end{aligned} \tag{5.36}$$

$$\begin{aligned}
G_{out}^p &= G_{out}^b \times \frac{W_{out}}{\sum_{i=1}^n G_{out}^b} \\
&= 2016 \times \frac{6300}{5985} \\
&\approx 2122 \text{mg/m}^3
\end{aligned} \tag{5.37}$$

Para concluir, a equação 5.38 apresenta o cálculo da eficiência fraccional para o diâmetro exemplo.

$$\begin{aligned}
\eta(0.265\mu\text{m}) &= 1 - \frac{G_{out}^p(0.265\mu\text{m})}{G_{in}^p(0.265\mu\text{m})} \\
&= \left(1 - \frac{2122}{3914}\right) \times 100 \\
&\approx 45.79\%
\end{aligned} \tag{5.38}$$

5.4.4 Exemplo de cálculo COULTER entrada vs. COULTER saída

Para este caso parte-se dos valores obtidos através da isocinética para as massas totais à entrada e à saída e em seguida transformam-se essas massas totais nas respectivas para cada diâmetro do Coulter, permitindo obter a eficiência de captura COULTER à entrada vs. COULTER à saída.

Embora o COULTER devolva diversas informações acerca da amostra (diâmetro médio, mediana, área superficial, etc.), o que é relevante para o cálculo da eficiência fraccional do sistema é a distribuição não cumulativa (função densidade de probabilidade). Este facto, combinado com o conhecimento das massas de pó à entrada e à saída, permite calcular a eficiência fraccional de cada diâmetro.

Na Tabela 5.6 é apresentado um exemplo (ainda que truncado) dos resultados do COULTER à entrada e à saída, assim como a respectiva eficiência fraccional.

As três primeiras colunas da Tabela 5.6 correspondem às distribuições cumulativas devolvidas pelo COULTER, enquanto as três colunas adjacentes correspondem à transformação destas, em distribuições não cumulativas.

Analisando apenas a distribuição cumulativa, é possível retirar várias conclusões, como por exemplo, que:

- para um diâmetro menor do que $0.070 \mu\text{m}$ o sistema tem uma captura total, uma vez que entram 0.065% em massa de partículas menores do que este diâmetro e não são detectadas quaisquer partículas menores do que este diâmetro à saída;

Tabela 5.6 Cálculo da eficiência fraccional COULTER à entrada vs. COULTER à saída

Diâmetro	Entrada	Saída	Diâmetro	Entrada	Saída	Eficiência
Menor (μm)	cum. (%)	cum. (%)	médio (μm)	(%)	(%)	(%)
0.040	0.000	0	0.042	0.001	0.000	100.00
0.044	0.001	0.000				
...	...	...	...	...	...	...
0.064	0.037	0.000	0.067	0.028	0.000	100.00
0.070	0.065	0.000	0.074	0.036	0.000	99.96
0.077	0.101	0.000				
...	...	...	...	...	...	...
0.311	1.796	4.929	0.327	0.220	1.300	23.08
0.342	2.016	6.229	0.359	0.240	1.500	18.65
0.375	2.256	7.729	0.394	0.260	1.690	15.39
0.412	2.516	9.419	0.432	0.280	1.890	12.14
0.452	2.796	11.309	0.474	0.300	2.070	10.19
0.496	3.096	13.379	0.521	0.330	2.230	12.04
0.545	3.426	15.609	0.572	0.360	2.340	15.39
0.598	3.786	17.949	0.628	0.390	2.450	18.23
0.657	4.176	20.399				
...	...	...	...	...	...	...
6.761	36.286	97.789	7.091	2.240	1.770	89.71
7.421	38.526	99.559	7.784	2.320	0.420	97.64
8.147	40.846	99.979	8.546	2.420	0.044	99.76
8.944	43.266	100.000	9.382	2.550	0.000	100.00
9.819	45.816	100.000				
...	...	...	...	...	...	...
57.770	99.076	100.000	60.590	0.620	0.000	100.00
63.410	99.696	100.000	66.515	0.270	0.000	100.00
69.620	99.966	100.000	73.025	0.058	0.000	100.00
76.430	100.000	100.000				
GLOBAL	-	-	-	-	-	86.98

- a partir do diâmetro 8.944 μm , a captura é total, pois não são detectadas à saída quaisquer partículas maiores do que este diâmetro;
- o maior diâmetro presente à entrada, é 76.43 μm , uma vez que não são detectadas quaisquer partículas maiores do que estas.

A expressão de cálculo da eficiência fraccional pelo COULTER é dada pela equação 5.39. Nesta usa-se a distribuição não cumulativa e a correspondente percentagem de cada um dos diâmetros à entrada e à saída (%in ou %out), assim como o caudal mássico de partículas à entrada e à saída do sistema (W_{in} ou W_{out}).

$$\eta(d) = 1 - \frac{W_{out} \times \%_{out}(d)}{W_{in} \times \%_{in}(d)} \quad (5.39)$$

Considerando como exemplo o diâmetro médio 0.327 μm , apresenta-se na equação 5.40 o exemplo de cálculo da eficiência fraccional para esse diâmetro.

$$\begin{aligned} \eta(0.327\mu\text{m}) &= 1 - \frac{W_{out} \times \%_{out}(d)}{W_{in} \times \%_{in}(d)} \\ &= \left(1 - \frac{6300 \times 1.3}{48400 \times 0.22}\right) \times 100 \\ &\approx 23.08\% \end{aligned} \quad (5.40)$$

Analisando os valores de eficiência para diâmetros intermédios, a eficiência prevista pela combinação dos valores de entrada e de saída do COULTER, tende para que exista um vale, isto é, a curva de eficiência fraccional desça abruptamente, voltando a valores de eficiência de captura mais elevados para partículas maiores.

No caso apresentado, a partir do diâmetro $\approx 0.074\mu\text{m}$ os valores de eficiência de captura baixam de 100%, até ao diâmetro para o qual se prevê o menor valor de eficiência de captura ($\approx 0.474\mu\text{m}$), para o qual se prevê um valor de 10.19 % de eficiência e a partir deste diâmetro, as eficiências aumentam monotonicamente até captura completa, que corresponde a um diâmetro de $\approx 8.546\mu\text{m}$.

Este vale é uma característica evidenciada apenas pelas curvas de eficiência fraccional COULTER entrada vs. COULTER saída.

5.5 Ensaios experimentais

No sentido de identificar os principais pontos a destacar em cada caso experimental, apresenta-se na Tabela 5.7 a informação mais relevante para cada um dos casos experimentais.

Tabela 5.7 Síntese das variáveis alteradas em cada um dos casos experimentais apresentados

Variável	ID do CASO						
	1	2	3	4	5	6	7
Concentração (baixa)	-	X	-	-	-	-	-
Concentração (elevada)	-	-	X	X	-	-	X
Condições operatórias	-	-	-	-	-	X	-
Configuração do sistema	X	X	-	-	X	-	-
Supressão de corrente	-	-	-	-	-	-	X

5.5.1 Caso 1 - Ciclone isolado

Com este caso pretende-se evidenciar o comportamento do ciclone a operar isoladamente, para um pó com uma distribuição de tamanho de partículas de largo espectro.

Assim sendo, seguindo a estrutura base para os casos experimentais apresentados, começa-se por caracterizar as partículas injectadas, apresentando em seguida as curvas de eficiência fraccional e eficiência global obtida, concluindo destacando os principais tópicos a reter acerca deste caso experimental.

Condições de operação

Neste caso, como já referido, foi apenas estudado o sistema composto por ciclone isolado, tendo-se optado por operar com o ventilador principal a 50 Hz, o que implicou uma velocidade média de entrada de $\approx 20\text{m/s}$ e uma queda de pressão no ciclone de 1.17kPa .

Caracterização das partículas

Para caracterizar de uma forma sucinta as partículas do pó analisado nestas condições operatórias diferentes, foi determinada a massa volúmica real do pó alimentado ao piloto. Além disso, foi ainda determinada a distribuição de tamanho de partículas alimentada ao sistema piloto, usando para isso o medidor Coulter LS 230, já referenciado nos casos anteriores.

Focando nas massa volúmica do pó analisado neste caso experimental, obteve-se para a massa volúmica real ($\rho_p = 1608\text{kg}_{\text{solido}}/\text{m}^3_{\text{solido}}$), e o ensaio apresentado foi efectuado a uma concentração $\approx 0.65\text{g}/\text{m}^3$.

Tendo esta explicação presente, na Figura 5.15 é apresentada a distribuição de tama-

nho de partículas que deu entrada no sistema e as distribuições de tamanho de partículas que escaparam nas várias configurações estudadas.

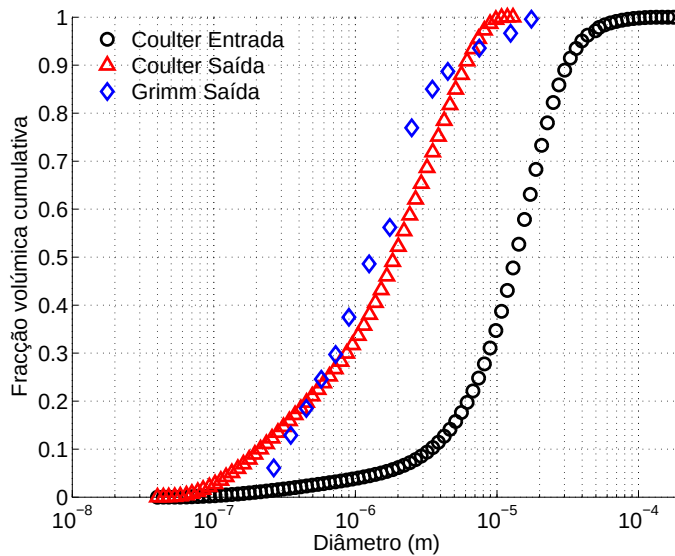


Figura 5.15 Distribuição de tamanho de partículas: entrada no sistema e emissões gasosas

Na distribuição à entrada é possível constatar que $\approx 5\%$ das partículas são sub-micrométricas e que as partículas com maiores dimensões têm diâmetros superiores a $100\mu\text{m}$.

Assim sendo, com esta distribuição à entrada, temos partículas pequenas para aglomerarem com partículas grandes, sendo possível prever que a aglomeração será um fenómeno muito relevante para o comportamento final do ciclone isolado.

Em relação às distribuições à saída, as medições *offline* são similares às medições *online*, sendo que ambas prevêem que a emissões tenham uma mediana de entre $1.5 - 2\mu\text{m}$ e que não escapem quaisquer partículas de diâmetros superiores a $12.5\mu\text{m}$.

A concordância entre as distribuições à saída, prova que para uma concentração moderadamente baixa, a medição *online* produz resultados fidedignos, uma vez que, pelos princípios anteriormente enunciados, consideram-se sempre válidas as medições *offline*.

Eficiências fracionais e globais

Em relação às curvas de eficiência fraccional, estas são apresentadas na Figura 5.16. Apresentam-se na Figura, a eficiência fraccional experimental, a previsão feita pelo modelo de Mothes e Löffler (1988) e a previsão feita pelo modelo PACyc.

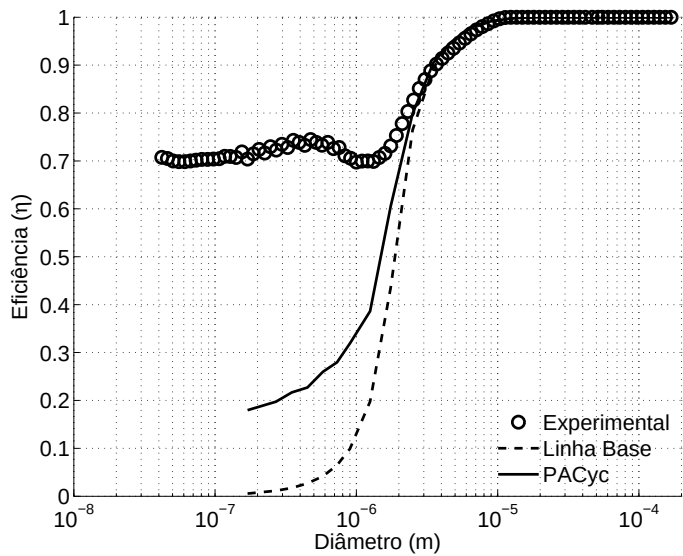


Figura 5.16 Curvas de Eficiência Fraccional

As eficiências globais para cada uma das séries apresentadas Figura 5.16 são apresentadas na Tabela 5.8 e é possível concluir que o modelo PACyc prevê melhor a eficiência global do que o modelo de Mothes e Löffler (1988), ainda que preveja por defeito a captura das partículas com diâmetros inferiores a 1.5µm.

Tabela 5.8 Eficiência global experimental e prevista por Smolik e PACyc

Mothes e Löffler (1988) (%)	PACyc (%)	Experimental (%)
93.2	96.9	96.7

Os diâmetros amostrados pelo modelo PACyc são escolhidos de forma a representar os diâmetros do GRIMM, havendo restrições em termos de CPU e de memória para amostrar diâmetros inferiores a 0.115 µm.

Conclusões

Fica evidente que, embora a curva de eficiência fraccional não seja próxima da obtida experimentalmente, o modelo PACyc prevê bastante bem a eficiência global do sistema com o ciclone a operar isoladamente.

Neste caso, a muito menor eficiência prevista pelo modelo PACyc abaixo de $\approx 1\mu\text{m}$ é compensada pela ligeira maior eficiência acima de $\approx 3\mu\text{m}$, onde a distribuição à entrada tem a sua maior contribuição para a massa total.

5.5.2 Caso 2 - Configuração do sistema e baixa concentração

Este caso de estudo surge para demonstrar que este sistema estudado é altamente eficiente para sistemas a funcionar mesmo a muito baixas concentrações.

Assim sendo optou-se por analisar a capacidade de captura deste sistema para o pó presente no ar ambiente.

Como se trabalhou a concentrações muito baixas, considerou-se que o sistema de medição GRIMM conduzia a resultados de medição precisos, quer à entrada quer à saída do sistema.

De qualquer modo, uma isocinética gravimétrica quer à entrada quer à saída seria incomportável pelo tempo necessário para recolher uma massa representativa nos filtros, condição necessária para uma medição quantitativa aceitável.

Condições de operação

Considerando as medições *online* feitas pelo GRIMM, foram estudadas as três configurações do sistema diferentes: ciclone isolado, ciclone com recirculação mecânica e ciclone com recirculação mecânica e electrostática.

Em relação ao estudo do sistema com o ciclone isolado, optou-se por operar com o ventilador principal a 30Hz, o que implicou uma velocidade média de entrada de $\approx 11\text{m/s}$ e uma queda de pressão no ciclone de 0.40kPa.

Quando se introduziu a recirculação mecânica, este ensaio foi realizado com o ventilador principal a operar a 30Hz e o ventilador de recirculação a operar a 30Hz. Nestas condições, obteve-se uma velocidade média de entrada no ciclone de $\approx 14\text{m/s}$ e uma velocidade média de saída de $\approx 8\text{m/s}$. Quanto a quedas de pressão obteve-se no ciclone 0.57kPa e no sistema de 0.87kPa.

Quando ao sistema se acrescentou o campo eléctrico induzido no fio presente no recirculador, este foi obtido através de um fio com 0.8mm de diâmetro, com um comprimento de 0.95m aplicando um potencial de 50kV.

Uma particularidade deste caso é que não foi usado o alimentador de partículas para introduzir partículas no sistema, considerando apenas as partículas suspensas que estavam no ar ambiente na altura da amostragem. Como indicador, será expectável que a esta alimentação corresponda uma concentração à entrada de $\ll 100\text{mg}/\text{m}^3$.

Caracterização das partículas

Devido às restrições nos equipamentos de medida de densidades e ao facto do pó atmosférico ter uma constituição variável, considerou-se apenas a medição da entrada no sistema através do granulómetro laser GRIMM para caracterizar esta alimentação. Para as simulações do PACyc apresentadas, considerou-se a massa volúmica do sólido ($\rho_p = 2000\text{kg}_{\text{sólido}}/\text{m}^3_{\text{sólido}}$). A concentração de poeira à entrada do sistema foi $\approx 45\mu\text{g}/\text{m}^3$, directamente determinada pelo granulómetro laser à entrada.

A Figura 5.17 apresenta a distribuição de tamanho de partículas que deu entrada no sistema e as distribuições de tamanho de partículas das emissões nas várias configurações estudadas.

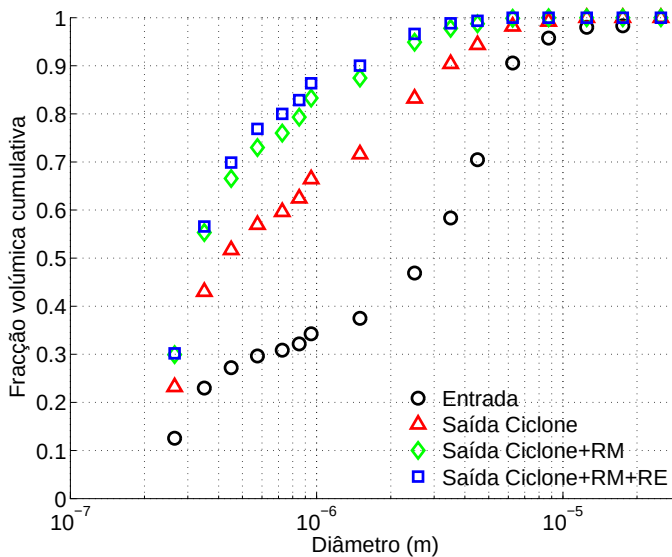


Figura 5.17 Distribuição de tamanho de partículas: entrada e emissões do sistema

É possível constatar que a poeira à entrada tem uma mediana de $\approx 2 - 3\mu\text{m}$ e que cerca de 35% das partículas à entrada são submicrométricas. Em relação às emissões, é de destacar que conforme o sistema tem uma performance melhor, a mediana da dis-

tribuição à saída se desloca gradualmente para partículas menores, sendo que, mesmo a muito baixas concentrações, o sistema remove a totalidade das partículas com diâmetros maiores do que $7.5\mu\text{m}$.

Eficiências fracionais e globais

Na Figura 5.18 são apresentadas as curvas de eficiência fracional das várias configurações estudadas.

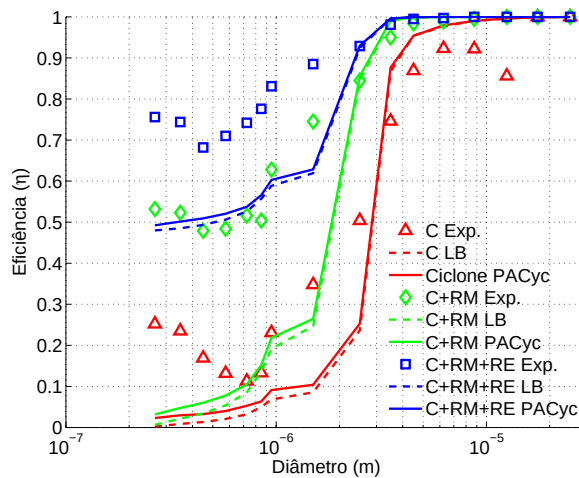


Figura 5.18 Curvas de Eficiência Fracional

Às curvas de eficiência fracional apresentadas na Figura 5.18, correspondem eficiências globais apresentadas na Tabela 5.9, e é possível concluir que o modelo PACyc (ainda que aproxime ligeiramente mais o valor de eficiência global previsto do obtido experimentalmente) não prevê de uma forma aproximada o comportamento do sistema, sendo que o valor após aglomeração é muito próximo do valor da linha de base.

Tabela 5.9 Eficiência global experimental e prevista por Mothes e Löffler (1988) e PACyc

Configuração do sistema	Linha Base (%)	PACyc (%)	Experimental (%)
Ciclone	53.5	54.5	59.6
Ciclone + RM	63.0	64.0	80.4
Ciclone + RM + RE	80.7	81.3	89.9

Conclusões

Este foi o caso que levou em linha de conta um esquema de despistagem de fenómenos responsáveis pela anormalmente elevada captura de partículas finas neste tipo de sistema, uma vez que se teorizaram à partida que estas elevadas capturas eram resultado de:

1. **Aglomeração das partículas antes destas entrarem no ciclone:** considerando que as partículas entram aglomeradas no ciclone, estas comportar-se-iam como se tivessem diâmetros maiores do que os nominais. Para testar esta hipótese, ao retirar o alimentador de poeiras (que no sistema estudado seria o ponto preferencial de aglomeração pré-ciclone) consegue-se eliminar a principal fonte de aglomeração pré-ciclone;
2. **Bloqueio do acesso das partículas finas ao vórtice central pelas partículas maiores:** considerando que devido ao campo de concentrações se formaria preferencialmente uma “parede” de partículas maiores, bloqueando o acesso das partículas mais pequenas ao canal central de saída, isso poderia levar ao aumento da eficiência de captura das partículas pequenas. Operando a muito baixas concentrações, não é provável que este fenómeno aconteça;
3. **Transporte das partículas pequenas para a parede do ciclone sendo arrastadas pelos grandes turbilhões dentro do ciclone:** poder-se-ão gerar condições de turbulência que favoreçam particularmente o arrastamento das partículas mais pequenas para a parede, através de turbilhões de tamanho elevada em comparação com o tamanho das partículas. Esta parece ser uma hipótese válida, sendo particularmente evidente para os casos a muito baixas concentrações, não tendo sido possível neste trabalho confirmar esta hipótese.
4. **Aglomeração interparticular dentro do ciclone:** sendo esta a hipótese defendida neste trabalho, considera-se que o campo de velocidades dentro do ciclone favorece as colisões interparticulares e que destas se geram aglomerados de partículas que se comportam dinamicamente como partículas maiores, sendo por isso capturados com eficiências elevadas.

Levando as hipóteses apresentadas em linha de conta e considerando a incapacidade de previsão do modelo PACyc dos resultados obtidos experimentalmente, conclui-se que o fenómeno de aglomeração interparticular não é o fenómeno dominante no aumento da eficiência de captura das partículas mais pequenas para sistemas muito diluídos.

Teoriza-se que fenómenos de arrastamento de partículas pequenas para as paredes nos grandes turbilhões e/ou o estabelecimento de forças eléctricas não levadas em linha de conta no modelo de aglomeração usado no modelo PACyc poderão justificar o aumento da captura das partículas a muito baixas concentrações, sendo que estes fenómenos são dominantes a baixas concentrações, uma vez que a concentrações moderadas e alta, o fenómeno de aglomeração interparticular parece conduzir a resultados muito próximos dos obtidos experimentalmente, como verificado a seguir.

5.5.3 Caso 3 - Alta concentração

No sentido de evidenciar a reprodutibilidade dos resultados experimentais assim como das previsões do PACyc a concentrações mais elevadas, apresenta-se o primeiro de dois casos que pretendem validar o modelo PACyc no sentido da previsão do sistema a operar com ciclone isoladamente.

Condições de operação

Neste caso foi estudado o sistema composto por ciclone isolado, tendo-se optado por operar com o ventilador principal a 50 Hz, o que implicou uma velocidade média de entrada de $\approx 20\text{m/s}$ e uma queda de pressão no ciclone de 1.17kPa .

Caracterização das partículas

A Figura 5.19 mostra a distribuição de tamanho de partículas que dá entrada no sistema, assim como as respectivas emissões. À semelhança dos casos anteriores, os triângulos vermelhos correspondem às medidas *offline* das emissões usando um granulómetro laser Coulter LS230 de pó mineral calcinado enquanto os losangos azuis correspondem às medições *online* do granulómetro GRIMM 1.108 para a mesma amostra. A estas amostras corresponde uma massa volúmica real (ρ_p) de $2700\text{kg}_{\text{solido}}/\text{m}^3_{\text{solido}}$ e uma concentração de entrada (C_0) de $\approx 1.28\text{g}/\text{m}^3$.

Em relação à distribuição à entrada, esta tem uma mediana de $\approx 9\mu\text{m}$ e cerca de 8% são partículas submicrométricas. Em relação às distribuições à saída, o comportamento é reprodutível em relação ao caso apresentado na Secção 5.5.1, correspondendo neste caso a uma mediana à saída de $\approx 1\mu\text{m}$ para o Coulter e $\approx 1.6\mu\text{m}$ para o GRIMM e que não escapam ao sistema quaisquer partículas com diâmetros superiores a $\approx 10\mu\text{m}$ para o Coulter e $17.5\mu\text{m}$ para o GRIMM.

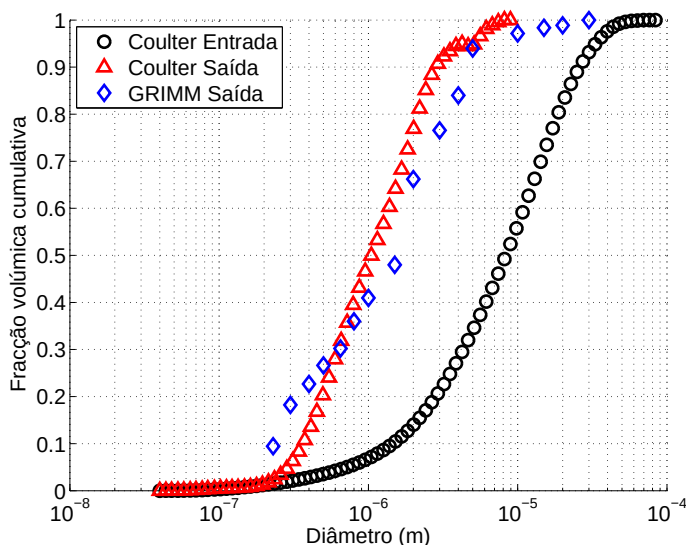


Figura 5.19 Distribuição tamanho de partículas: entrada do sistema e emissões

Eficiências fracionais e globais

A Figura 5.20 apresenta uma comparação entre o modelo de Mothes e Löffler (1988), as previsões PACyc e as experiência realizada.

Considerando as curvas de eficiência fracionais apresentada na Figura 5.20, estas mostram que o modelo PACyc prevê razoavelmente bem os dados experimentais, prevendo por excesso a eficiência de captura das partículas entre $0.3 - 0.7\mu\text{m}$ e por defeito para as partículas menores que $\approx 0.3\mu\text{m}$.

A Tabela 5.10 apresenta as eficiências globais de captura correspondentes para os casos mostrados na Figuras 5.20. É possível concluir que o modelo PACyc prevê melhor a eficiência experimental em geral do que o modelo de Mothes e Löffler (1988).

No sentido de fazer previsões para concentrações mais elevadas, foram feitas simulações com o modelo de Mothes e Löffler (1988) e o modelo PACyc, tendo estas sido comparadas com os valores de eficiência experimental, conforme se apresentada na Figura 5.21.

Além disso, na Figura 5.21 apresenta-se o resultado do modelo proposto por Smolik (Svarosvsky, 1981) para prever a eficiência global de uma concentração elevada (c_2), sabendo que eficiência global tem um valor determinado valor a uma concentração inferior (c_1).

Este modelo prevê que a eficiência à concentração c_2 seja dada pela equação 5.41,

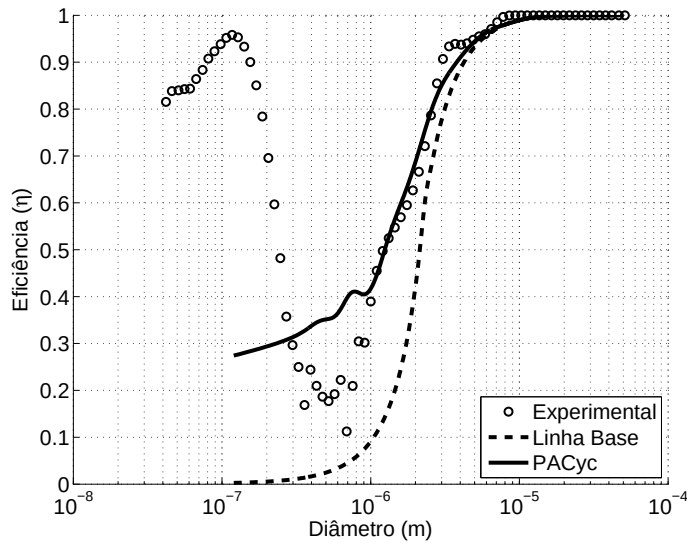


Figura 5.20 Curva de eficiência fraccional experimental e previsão do PACyc

Tabela 5.10 Eficiência global experimental e prevista por Mothes e Löffler (1988) e PACyc

Mothes e Löffler (1988) (%)	PACyc (%)	Experimental (%)
83.6	89.2	89.9

onde a constante empírica proposta por Smolik é $k = 0.18$. Se considerarmos válido este valor de k , este prevê por excesso a eficiência global dos casos de maior concentração.

$$\eta(c_2) = 1 - (1 - \eta(c_1)) \left(\frac{c_1}{c_2} \right)^k \quad (5.41)$$

Considerando que para o pó analisado nesta experiência, o caso a baixa concentração corresponde a $c_1 = 56.5 \text{ mg/m}^3$ cuja eficiência global de captura foi de $\eta(c_1) = 87.0\%$, chegou-se à conclusão que o valor de k que melhor ajusta aos valores experimentais foi $k \approx 0.0887$, o que pode ser interpretado como consequência deste pó aglomerar menos do que o esperado por Smolik (Svarovsky, 1981), não sendo por isso $k=0.18$ o valor universal a adoptar para previsão da eficiência global para elevadas concentrações.

Para concluir a análise da Figura 5.21, fica evidenciado o facto do modelo de Mothes e Löffler (1988) não levar em linha de conta a concentração à entrada, levando a que este faça sempre uma previsão por defeito do performance do sistema a concentrações mais elevada. Este é um facto que foi já demonstrado que à escala laboratorial quer à

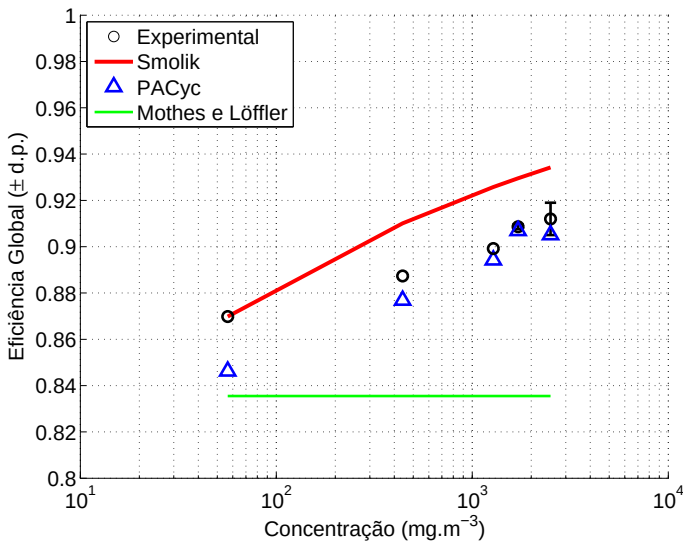


Figura 5.21 Eficiências globais em função da concentração

escala industrial (Paiva et al., 2010).

Conclusões

Este caso mostra que o modelo PACyc é uma clara melhoria na previsão das curvas de eficiência fraccional. É de destacar que o modelo PACyc prevê de uma forma mais precisa a eficiência global do sistema, desde concentrações moderadamente baixas até valores mais elevados.

Ainda que a eficiência global prevista tenha um valor muito próximo do obtido experimentalmente, fica evidente uma das outras limitações do modelo PACyc: este não tem a capacidade de prever as curvas em forma de gancho, que são obtidas experimentalmente. Adiante, nas principais conclusões a retirar de todos os ensaios experimentais, serão avançadas algumas hipóteses no sentido de tentar justificar o porquê desta incapacidade.

5.5.4 Caso 4 - Alta concentração

Este é o segundo dos dois casos que pretendem validar o modelo PACyc no sentido de previsão do sistema a operar com ciclone isoladamente a alta concentração.

Condições de operação

À imagem do caso de estudo apresentado na Secção 5.5.3, neste caso foi estudado o sistema composto por ciclone isolado, tendo-se optado por operar com o ventilador principal a 50 Hz, o que implicou uma velocidade média de entrada de $\approx 20\text{m/s}$ e uma queda de pressão no ciclone de 1.17kPa .

Caracterização das partículas

A Figura 5.22 mostra a distribuição de tamanho de partículas que dá entrada no sistema, assim como as respectivas emissões. À semelhança dos casos anteriores, os triângulos vermelhos correspondem às medidas *offline* das emissões usando um granulómetro laser Coulter LS230 do pó mineral calcinado enquanto os losangos azuis correspondem às medições *online* do granulómetro GRIMM 1.108 para a mesma amostra. A estas amostras corresponde uma massa volúmica real (ρ_p) de $3230\text{kg}_{\text{solido}}/\text{m}^3_{\text{solido}}$ e uma concentração média de entrada (C_0) de $\approx 2.90\text{g}/\text{m}^3$.

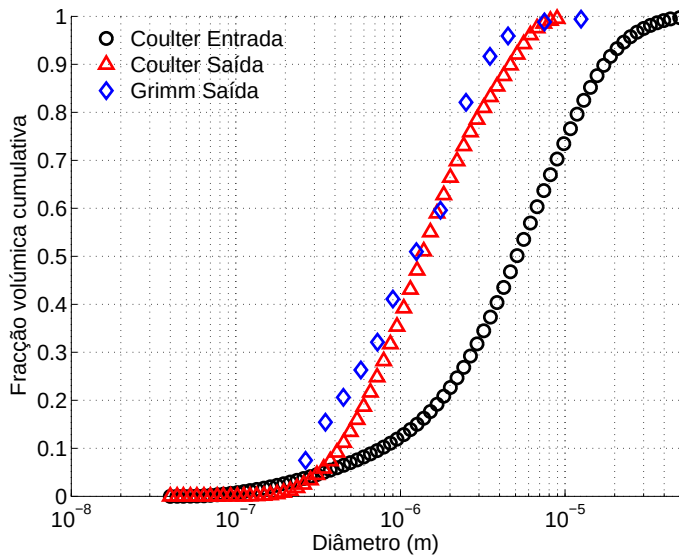


Figura 5.22 Distribuição tamanho de partículas: entrada do sistema e emissões

Em relação à distribuição à entrada, esta tem uma mediana de $\approx 5\mu\text{m}$ e cerca de 13% são partículas submicrométricas. Em relação às distribuições à saída, o comportamento é reprodutível em relação ao caso apresentado na Secção 5.5.3, correspondendo neste caso a uma mediana à saída de $\approx 1\mu\text{m}$ quer para o Coulter quer para o GRIMM.

Além disso, neste ensaio não escapam ao sistema quaisquer partículas com diâmetros superiores a $\approx 10\mu\text{m}$.

Eficiências fraccionais e globais

A Figura 5.23 apresenta uma comparação entre os modelo de Mothes e Löffler (1988), as previsões PACyc e a média das experiências realizadas.

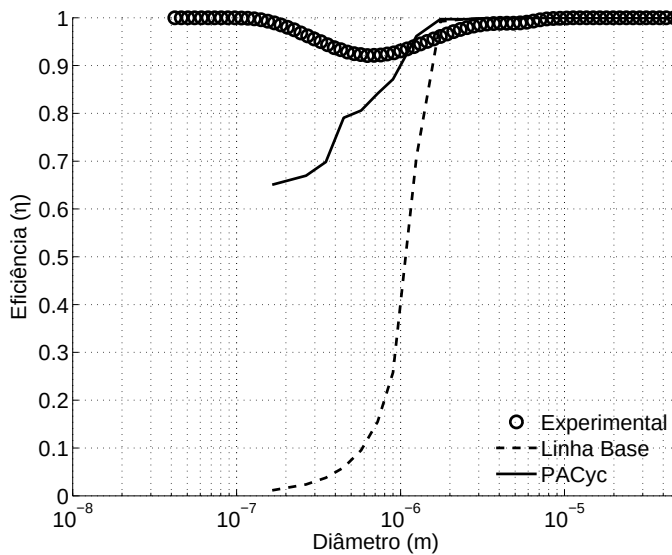


Figura 5.23 Curva de eficiência fraccional experimental e previsão do PACyc

Considerando as curvas de eficiência fraccionais apresentada na Figura 5.23, estas mostram que o modelo PACyc prevê razoavelmente bem os dados experimentais, prevendo por excesso a eficiência de captura das partículas entre $1.5 - 2.0\mu\text{m}$ e por defeito para as partículas menores que $\approx 1.5\mu\text{m}$.

A Tabela 5.11 apresenta as eficiências globais de captura correspondentes para os casos mostrados na Figuras 5.23. Analisando as eficiências globais, é possível concluir que o modelo PACyc prevê por defeito a eficiência experimental, mas esta tem um valor muito mais próximo previsto pelo PACyc do que proposto pelo modelo de Mothes e Löffler (1988).

À imagem do caso apresentado na Secção 5.5.3 foram feitas simulações com o modelo de Mothes e Löffler (1988), o modelo PACyc e o modelo de Smolik (Svarosvky, 1981) tendo estas sido comparadas com os valores de eficiência experimental, conforme se apresentada na Figura 5.24.

Tabela 5.11 Eficiência global experimental e prevista por Mothes e Löffler (1988) e PACyc para um caso com a concentração média

Mothes e Löffler (1988) (%)	PACyc (%)	Experimental (%)
92.3	97.9	98.1

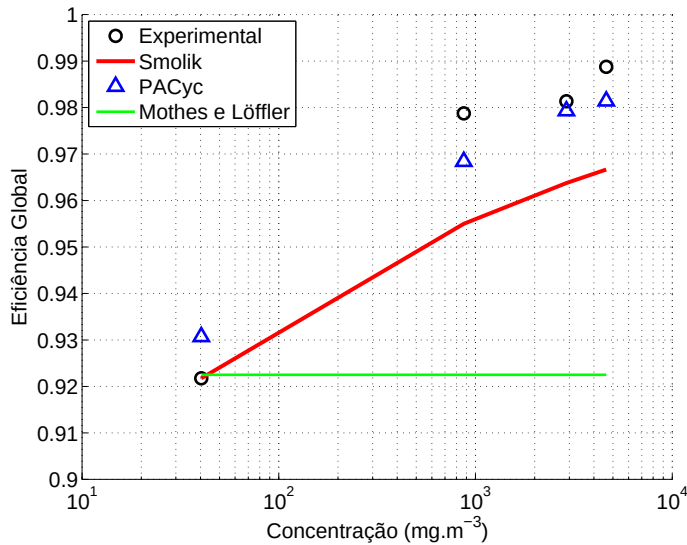


Figura 5.24 Eficiências globais em função da concentração

Neste caso, com o valor de $k = 0.18$ proposto por Smolik, os valores da eficiência global prevêem por defeito o valor da eficiência global para os ensaios a concentrações mais elevadas.

Para o pó analisado nesta experiência, o caso a baixa concentração corresponde a $c_1 = 40.3 \text{ mg/m}^3$ cuja eficiência global de captura foi de $\eta(c_1) = 92.2\%$. Chega-se à conclusão que o valor de k que melhor ajusta aos valores experimentais foi $k \approx 0.380$, o que pode ser interpretado como se este pó aglomere mais do que o esperado por Smolik (Svarovsky, 1981), reforçando de novo a hipótese que $k=0.18$ não é um valor universal a adoptar para previsão da eficiência global para elevadas concentrações.

Para concluir a análise da Figura 5.21, uma vez mais é evidenciado o facto do modelo de Mothes e Löffler (1988) não levar em linha de conta a concentração à entrada, o que neste caso implica que este modelo consiga fazer uma boa previsão da eficiência global para o caso a mais baixa concentração, prevendo no entanto cada vez mais por defeito a eficiência global conforme se aumenta a concentração à entrada.

Conclusões

Este caso corrobora a teoria de que o modelo PACyc é uma clara melhoria na previsão das curvas de eficiência fraccional e que este tem uma melhor performance na previsão da eficiência global do que as respectivas eficiências fraccionais.

O facto que merece mais ênfase, é que as previsões para concentrações mais elevadas estão muito mais próximas do que o modelo de Smolik, sendo que este último, para o pó analisado neste ensaio prevê claramente por defeito as eficiências globais de captura, conforme a concentração aumenta.

Além disso, o modelo PACyc com a sua formulação mais complexa tende a apresentar um comportamento tipo Smolik, o que torna o modelo mais robusto, uma vez que é aceite que uma correlação tipo Smolik represente o impacto da concentração na eficiência global à entrada (Hoffmann e Stein, 2002).

5.5.5 Caso 5 - Condições operatórias

No sentido de comparar a performance do sistema com e sem recirculação mecânica, apresentam-se dois casos publicados anteriormente por Salcedo e Pinho (2003), em que o produto recuperado era ácido sulfanílico.

Estes autores apresentam ainda a respectiva comparação da previsão do modelo sem aglomeração para cada caso, sendo aqui complementada com a previsão do modelo PACyc.

Por fim, tendo presente que um dos objectivos traçados inicialmente era a previsão da performance do sistema instalado na Fábrica de Ácido Sulfanílico da empresa CUF-Químicos Industriais, S.A. com recirculação electrostática, apresenta-se o resultado de uma simulação efectuada para as condições industriais.

Condições de operação

Neste caso, a instalação piloto estava directamente conectada à instalação industrial de produção de ácido sulfanílico, nas instalações da CUF - Químicos Industriais, S.A..

O ensaio com o ciclone isolado foi realizado a uma velocidade média de entrada no ciclone de $\approx 15\text{m/s}$ e com uma queda de pressão no ciclone de $\approx 0.95\text{kPa}$.

O ensaio com recirculação foi realizado a uma velocidade média de entrada no ciclone de $\approx 24\text{m/s}$ e uma velocidade média de saída do sistema de $\approx 20\text{m/s}$. Quanto a quedas de pressão obteve-se no ciclone $\approx 1.90\text{kPa}$ e no sistema de $\approx 2.40\text{kPa}$.

Caracterização das partículas

A massa volúmica real do pó era conhecida, tendo o valor de $\approx 1471 \text{ kg}_{\text{solido}}/\text{m}^3_{\text{solido}}$.

Para ambos os casos, foi determinada a distribuição de tamanho de partículas alimentada ao sistema piloto usando para isso o medidor Coulter LS 230, já referenciado nos casos anteriores, tendo-se considerado desajustada a medição *online*, devido às suas limitações.

A distribuição que dá entrada no sistema sem recirculação é apresentada na Figura 5.25 pela série com círculos pretos, enquanto que para o caso com recirculação, esta é representada pela série com cruzeiros azuis.

O ensaio com o ciclone isolado foi efectuado a uma concentração $\approx 7.71 \text{ g}/\text{m}^3$, enquanto que no ensaio com recirculação, a concentração a montante do sistema com recirculação foi $\approx 7.73 \text{ g}/\text{m}^3$.

Na Figura 5.25 são apresentadas as distribuições de tamanho de partículas nas emissões, quer para o caso sem recirculação corresponde à série com triângulos pretos e que para o caso com recirculação corresponde à série com quadrados azuis.

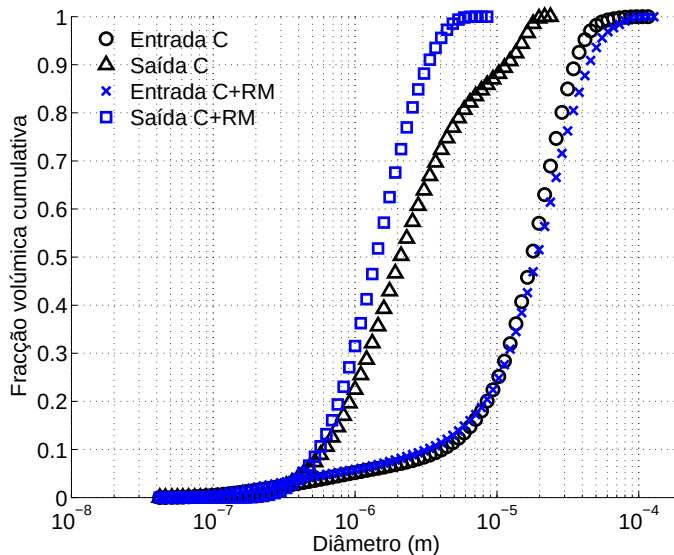


Figura 5.25 Distribuição de tamanho de partículas: entrada e emissões do sistema

Analisando a Figura 5.25, é possível constatar que a distribuição à entrada para ambos os casos é muito similar, tendo uma mediana de $\approx 17 \mu\text{m}$ e não apresentando partículas maiores do que $\approx 130 \mu\text{m}$.

Em relação às distribuições de tamanho de partículas das emissões, para o caso com ciclone isolado o sistema tem uma remoção completa das partículas de diâmetro $\approx 23\mu\text{m}$, enquanto que para o caso com recirculação esta ocorre para partículas com diâmetros maiores do que de $\approx 9\mu\text{m}$.

Eficiências Fracionais e Globais

Na Figura 5.26 são apresentadas as curvas de eficiência fraccional para os casos apresentados. Apresenta-se para cada caso a linha de base (linha a traço interrompido), a previsão do PACyc (linha a traço contínuo) e os respectivos resultados experimentais (circunferências). Em função da configuração dos sistema, a linha de base é obtida através do modelo de Mothes e Löffler (1988) para o caso do ciclone isolado ou pela combinação do modelo de Mothes e Löffler (1988) e o modelo de Salcedo et al. (2007) para o caso com recirculação.

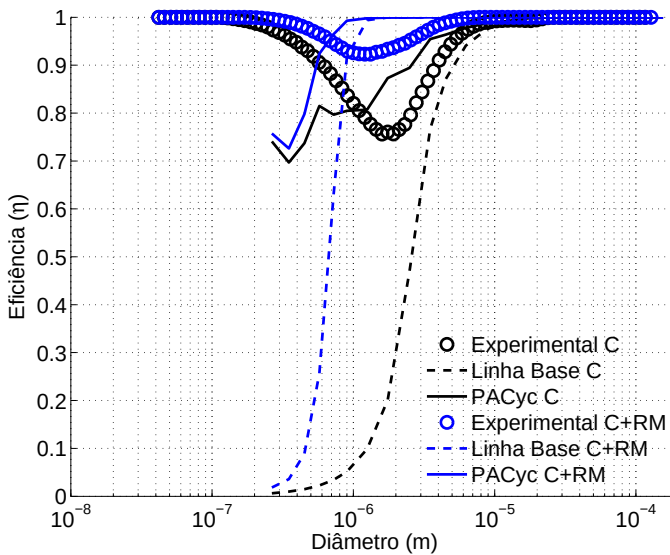


Figura 5.26 Curvas de Eficiência Fraccional

Analisando as curvas de eficiência fraccional, constata-se que para ambos casos o modelo PACyc prevê quer por defeito quer por excesso as eficiências fracionais de captura.

Para o caso com ciclone a funcionar isoladamente, as previsões são por defeito para partículas menores do que $\approx 1.0\mu\text{m}$, e por excesso para partículas com diâmetros no

intervalo $\approx 1.0 - 3.5\mu\text{m}$, apresentando eficiências de captura mais similares às obtidas experimentalmente, quando comparadas às do modelo que conduziu à linha de base.

Para o caso com recirculação mecânica a funcionar isoladamente, o modelo prevê por defeito para partículas menores do que $\approx 0.7\mu\text{m}$, prevendo por excesso para partículas com diâmetros no intervalo $\approx 0.7 - 3.0\mu\text{m}$. À semelhança do que ocorre para o casos com ciclone isolado, o modelo PACyc apresenta eficiências de captura mais similares às obtidas experimentalmente, quando comparadas às do modelo que conduziu à linha de base.

Estas previsões podem ser justificada pela limitação na amostragem representativa das partículas que dão entrada no sistema, uma vez que com uma amostragem de 500k partículas, apenas 2 partículas de diâmetro $17\mu\text{m}$ são inicialmente injectadas.

Na Tabela 5.12 apresentam-se as eficiências globais correspondentes às curvas de eficiência fraccional apresentadas na Figura 5.26, sendo possível constatar que o modelo PACyc prevê para ambos os casos um valor de eficiência global próximo do obtido experimentalmente, sendo evidente que o modelo PACyc é uma clara melhoria na previsão de sistemas não só de ciclones isolados mas também de sistemas com recirculação mecânica.

Tabela 5.12 Eficiência global experimental e prevista por Mothes e Löffler (1988) e Salcedo et al. (2007) e PACyc

Ensaio	Linha Base (%)	PACyc (%)	Experimental (%)
Ciclone	90.8	97.7	98.4
Ciclone + RM	95.9	99.1	99.6

Analisando os valores de eficiência experimental e tendo presente que o propósito deste ensaio era garantir *in situ* que o sistema tinha emissões abaixo do limite legal, para o caso do ensaio sem recirculação Salcedo e Pinho (2003) determinaram que a concentração das emissões foi $\approx 145\text{mg}/\text{Nm}^3$ enquanto que para o caso com recirculação, obteve-se uma concentração de emissões $\approx 38\text{mg}/\text{Nm}^3$, encontrando-se amplamente dentro dos limites de emissão legais (na altura, $300\text{mg}/\text{Nm}^3$).

Simulação com Recirculação Electrostática

Os resultados previstos para o sistema projectado para funcionamento com recirculação electrostática são apresentados na Figura 5.27, sendo que as respectivas eficiências globais são apresentadas na Tabela 5.13.

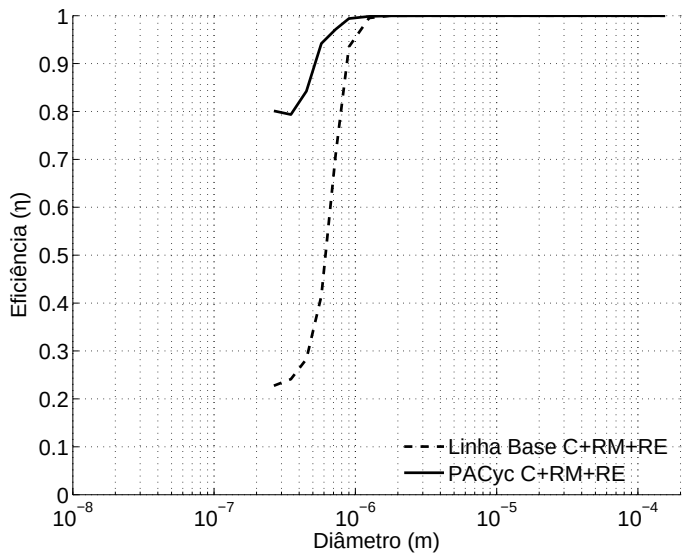


Figura 5.27 Curvas de Eficiência Fraccional previstas

Em relação à eficiência fraccional obtida, a curva é similar à com recirculação mecânica, prevendo apenas valores ligeiramente superiores aos obtidos apenas com recirculação mecânica.

Tabela 5.13 Eficiência global prevista pelo PACyc (com e sem aglomeração) e respectiva extrapolação* da eficiência global experimental

Ensaio	Linha Base (%)	PACyc (%)	Experimental (%)
Ciclone + RM + RE	96.7	99.3	99.8*

No entanto, em relação à eficiência global, constata-se que a recirculação electrostática é uma notória melhoria relativamente à recirculação mecânica, sendo que extrapolando para o caso da recirculação electrostática (em função das emissões experimentais obtidas com RM e a previsão do modelo PACyc para essa situação), prevê-se um valor de eficiência global “experimental” de 99.8%, a que correspondem emissões de $\approx 26\text{mg}/\text{Nm}^3$.

Conclusões

É possível concluir que neste caso o modelo PACyc leva a resultados de eficiência fraccional com divergências importantes aos obtidos experimentalmente, sendo no en-

tanto uma estimativa mais próxima do que as respectivas linhas de base, que no caso foram obtidas através da combinação dos modelos de (Mothes e Löffler, 1988) para previsão do ciclone e do modelo de Salcedo et al. (2007) para a previsão do ciclone recirculador.

Com a simulação do caso com recirculação electrostática, chega-se à conclusão que, caso seja de interesse, o sistema tem potencial para diminuir ainda mais as emissões, bastando para isso a inclusão de campo eléctrico nos recirculadores.

5.5.6 Caso 6 - Condições operatórias

No sentido de apresentar a performance do sistema com recirculação, apresenta-se um caso com recirculação electrostática usando o eléctrodo de referência, tendo este sido efectuado a duas condições de operação diferentes, de forma a que se possam comparar as performances do sistema em função das condições operatórias.

Condições de operação

O primeiro ensaio foi realizado com os ventiladores principal e de recirculação a operarem a 30Hz. Como já referido num caso anterior, nestas condições, obteve-se uma velocidade média de entrada no ciclone de $\approx 14\text{m/s}$ e uma velocidade média de saída do sistema de $\approx 8\text{m/s}$. Quanto a quedas de pressão obteve-se no ciclone 0.57kPa e no sistema 0.87kPa .

O segundo ensaio foi realizado com ambos os ventiladores a operarem a 40Hz e nestas condições, obteve-se uma velocidade média de entrada no ciclone de $\approx 18\text{m/s}$ e uma velocidade média de saída do sistema de $\approx 11\text{m/s}$. Quanto a quedas de pressão obteve-se no ciclone 1.03kPa e no sistema 1.50kPa .

Em ambos os ensaios, o campo eléctrico induzido no fio presente no recirculador foi obtido através de um fio com 0.8mm de diâmetro, com um comprimento de 0.95m aplicando um potencial de 50kV .

Caracterização das partículas

Para caracterizar de uma forma sucinta as partículas do pó analisado nestas condições operatórias diferentes, foi determinada a massa volúmica real do pó. Além disso, foi ainda determinada a distribuição de tamanho de partículas alimentada ao sistema piloto, usando para isso o medidor Coulter LS 230, já referenciado nos casos anteriores.

Focando nas massa volúmica do pó analisado neste caso experimental, obteve-se um valor de $\rho_p = 2386 \text{ kg}_{\text{solido}}/\text{m}^3_{\text{solido}}$ e uma concentração de $\approx 0.89 \text{ g}/\text{m}^3$ para o caso a 0.93 kPa e uma concentração de $\approx 0.57 \text{ g}/\text{m}^3$ para o caso a 1.60 kPa.

Para ambos os ensaios considera-se que a distribuição que dá entrada no sistema é a equivalente à apresentada na Figura 5.28 pela série com círculos pretos, sendo que esta corresponde a uma medição de uma amostra a granel.

Na Figura 5.28 são ainda apresentadas as distribuições de tamanho de partículas à saída, sendo que estas são obtidas não só através da medição *offline* mas também de uma forma *online*.

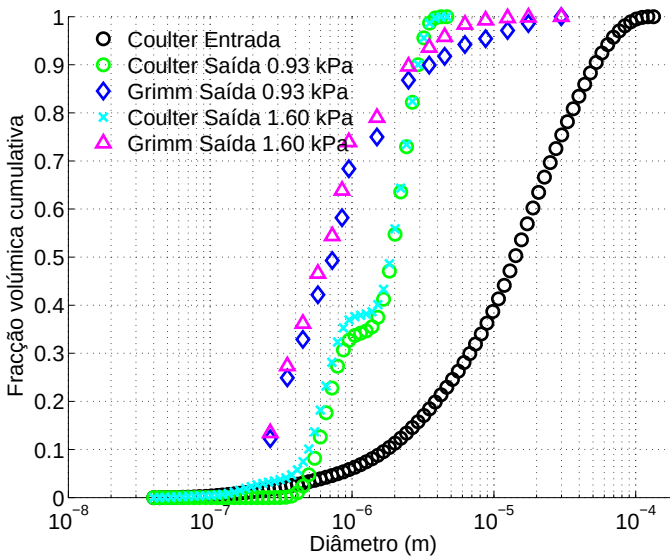


Figura 5.28 Distribuição de tamanho de partículas: entrada e emissões do sistema

Analisando a Figura 5.28, é possível constatar que a distribuição à entrada tem uma mediana $\approx 15 \mu\text{m}$ e não apresenta partículas maiores do que $\approx 150 \mu\text{m}$.

Em relação às distribuições de tamanho de partículas das emissões, as medições pelos métodos similares dão resultados próximos entre si, não dando no entanto, resultados similares entre métodos diferentes.

Com este caso evidencia-se uma vez mais as limitações da medição *online*, uma vez que se esta fosse a que é levada em linha de conta nas emissões, o sistema apenas teria a capacidade de remover completamente as partículas de diâmetros maiores do que $25 \mu\text{m}$, o que de facto não corresponde à realidade pois estas partículas não são detectadas *offline*. Assim, considerando válida a distribuição à saída obtida através de uma medição

offline, chega-se à conclusão que de facto o sistema tem uma remoção completa das partículas acima de $5\ \mu\text{m}$.

Eficiências Fraccionais e Globais

Na Figura 5.29 são apresentadas as curvas de eficiência fraccional para as duas condições operatórias deste ensaio. Para cada um dos ensaios apresenta-se a linha de base (linha a traço interrompido), a previsão do PACyc (linha a traço contínuo) e os respectivos resultados experimentais (circunferências)

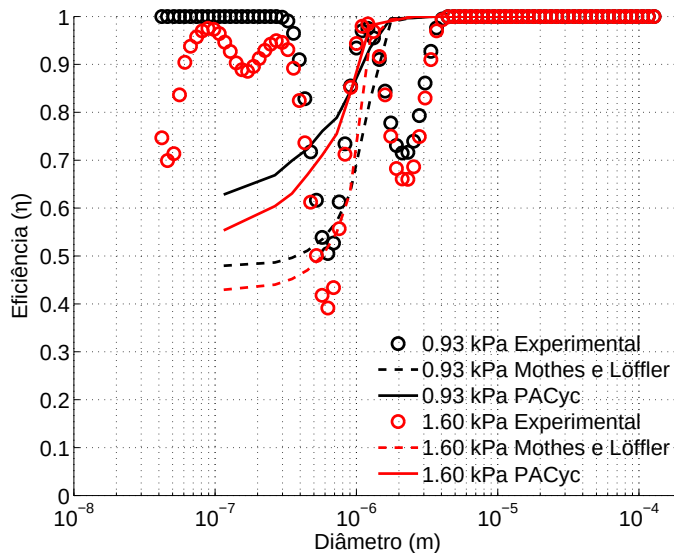


Figura 5.29 Curvas de Eficiência Fraccional

Analisando as curvas de eficiência fraccional, é evidente que quer para as previsões das linhas de base, quer para o modelo PACyc e mesmo para os resultados experimentais, o sistema a operar a mais elevada queda de pressão tem eficiências mais baixas. Isto pode ser justificado pelo facto do tempo de carga das partículas para o caso com maiores perdas de pressão ser menor, uma vez que a maiores quedas de pressão correspondem maiores velocidades de entrada no sistema.

Além disso, para as configurações com recirculação electrostática, o sistema apresenta uma forma tipo gancho, apresentando para ambos os casos um mínimo (global) de eficiência de captura para as partículas de $\approx 0.8\ \mu\text{m}$, sendo que este toma um valor de $\approx 40\%$ para o caso com maior queda de pressão, enquanto que para o caso com

menor queda de pressão, o valor mínimo da eficiência de captura é $\approx 50\%$.

Na Tabela 5.14 apresentam-se as eficiências globais correspondentes às curvas de eficiência fraccional apresentadas na Figura 5.29.

Tabela 5.14 Eficiência global experimental e prevista por Mothes e Löffler (1988) e PACyc

Ensaio	Linha Base (%)	PACyc (%)	Experimental (%)
0.93 kPa	94.4	97.0	96.6
1.60 kPa	94.7	96.7	96.0

Conclusões

É possível concluir que o modelo PACyc leva a resultados de eficiência fraccional mais próximos do que as respectivas linhas de base, que no caso foram obtidas através da combinação dos modelos de (Mothes e Löffler, 1988) para previsão do ciclone, modelo de Salcedo et al. (2007) para a previsão do ciclone recirculador e da combinação dos modelos apresentados por White (1963), Oglesby (1978) e Parker (1997) para previsão do efeito do campo eléctrico no recirculador.

Com este caso apresenta-se uma situação em que o aumento da velocidade da entrada no ciclone, implica um decréscimo da eficiência de captura do sistema, devido ao diminuição do tempo de carga das partículas.

5.5.7 Caso 7 - Supressão de corrente

Neste ensaio experimental pretende-se evidenciar a principal limitação do sistema a funcionar com recirculação electrostática: a supressão de corrente. Assim sendo, o pó estudado foi o mesmo do caso apresentado na Secção 5.5.6, tendo este sido escolhido devido ao facto de apresentar características particularmente reprodutíveis em termos de alimentação.

A supressão de corrente é função de diversos parâmetros já enunciados anteriormente aquando da introdução do sistema com recirculação electrostática, sendo de destacar que um dos principais é a concentração de partículas a serem carregadas electricamente, que no caso do sistema estudado neste trabalho, ocorre no recirculador.

Tendo em conta que a concentração de partículas dentro deste é muito difícil de estimar e que esta é aproximadamente proporcional à concentração que dá entrada no sistema, foi feito o cruzamento da informação acerca da supressão de corrente em função da concentração à entrada.

Uma consequência desta supressão de corrente, é o abaixamento da performance expectável do sistema, tendo por forma simples de analisar isso a eficiência global de captura.

A percentagem de supressão de corrente (*Sup*) é calculada pela equação 5.42, onde $i_{inicial}$ é a intensidade de corrente quando o sistema se encontra limpo e i_{final} é a intensidade de corrente quando o sistema se encontra a operar a uma dada concentração à entrada.

$$Sup(\%) = \left(\frac{i_{inicial}(\text{mA}) - i_{final}(\text{mA})}{i_{inicial}(\text{mA})} \right) \times 100 \quad (5.42)$$

Eficiências Globais

Levando em consideração os casos experimentais apresentados nas Secções 5.5.3 e 5.5.4, é expectável que a performance do sistema melhore conforme a concentração no sistema aumente.

Assim, para estes casos foram feitos estudos equivalentes aos apresentados para os casos onde se pretende evidenciar o impacto da concentração quando o sistema opera com ciclone isolado. Para além disso, neste casos apresentam-se a performance do sistema a operar com duas quedas de pressão total diferentes: 0.93 kPa e 1.60 kPa.

Tendo presente esta contextualização, as Figuras 5.30(a) e 5.30(b) apresentam as eficiência fraccionais experimentais, previstas pelo modelo sem aglomeração e pelo modelo PACyc.

Há a ter presente que o modelo sem aglomeração se baseia no modelo de Mothes e Löffler (1988) para prever a performance do ciclone, no modelo de Salcedo et al. (2007) para prever a performance do sistema com recirculação mecânica e que a este acopla uma combinação dos modelos de White (1963), Oglesby (1978) e Parker (1997) para prever o impacto da existência de campo eléctrico no recirculador. Para concluir, o modelo PACyc para obter as previsões apresentada considera que a linha de base para aglomeração é obtida considerando os três fenómenos envolvidos (esquema anteriormente apresentado como C+RM+RE+A) e que a superfície de separação é o cilindro central com diâmetro igual ao da saída do gás para a chaminé.

Supressão

A Figura 5.31(a) evidencia a evolução da percentagem de supressão da corrente inicial (calculada usando a equação 5.42) conforme se aumenta a concentração à entrada do sistema. Por outro lado, a Figura 5.31(b) pretende mostrar, através de um

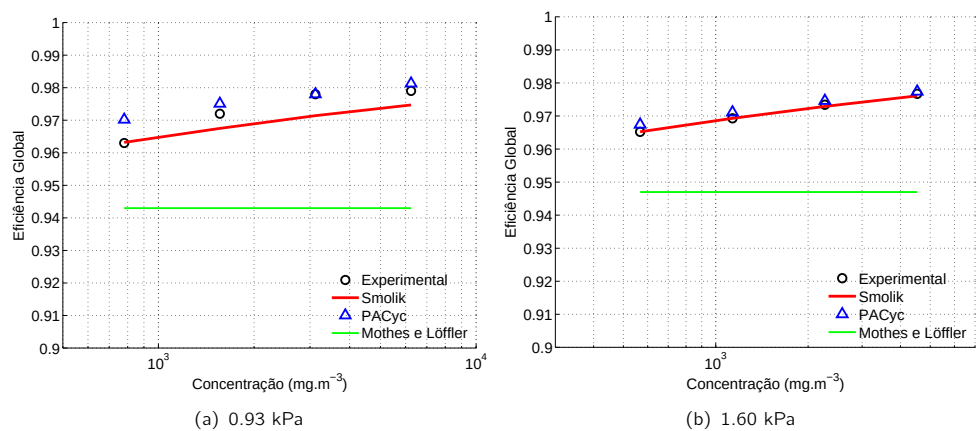


Figura 5.30 Eficiência global em função da concentração à entrada para dois casos com quedas de pressão total diferente

ajuste dos valores de supressão de corrente obtidos experimentalmente, qual o valor de concentração a partir do qual a supressão de corrente é total.

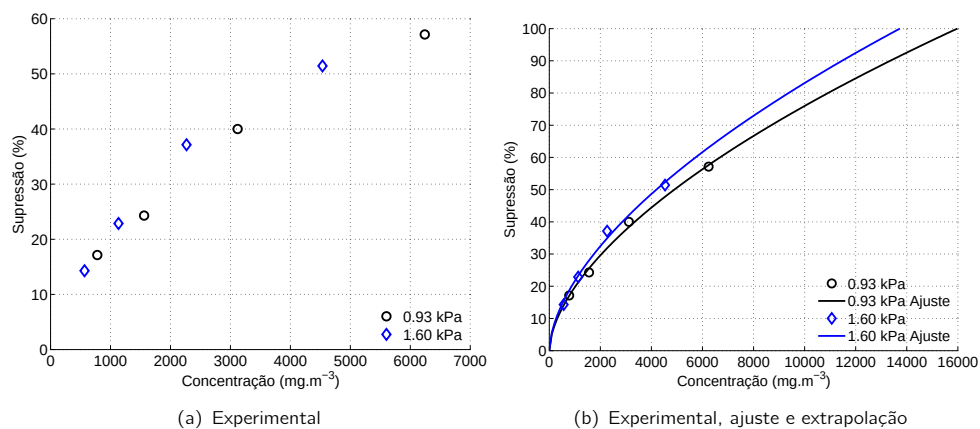


Figura 5.31 Supressão de corrente em função da concentração à entrada

Analisando a Figura 5.31(a) é possível constatar que para ambos os casos, com concentrações acima dos 4.5g/m^3 já se obtém uma supressão de corrente acima de 50%, o que deixa antever que existirá uma concentração não muito elevada, que implicará uma supressão total da corrente.

Tendo isto presente, com o ajuste em forma de potência apresentado na Figura 5.31(b), chega-se às seguintes conclusões:

- para o caso com as perdas de pressão de 0.93kPa a concentração para a supressão total é $\approx 15.9\text{g/m}^3$;
- para o caso com as perdas de pressão de 1.60kPa a concentração para a supressão total é $\approx 13.7\text{g/m}^3$.

Estes serão os valores de concentração a partir dos quais a performance do sistema com recirculação electrostática deve ser semelhante à do sistema apenas com recirculação mecânica de partículas.

É de referir que estes valores de concentração são meramente indicativos do principio do aumento da supressão de corrente conforme se aumenta a concentração de pó à entrada, sendo função de diversos parâmetros, como o tipo de eléctrodo, o tipo de pó, entre outros, não sendo por isso possível extrapolar os correspondentes valores limite de concentração para outros casos.

Conclusões

Este caso mostra que o aumento da concentração, para o caso particular do sistema a operar com recirculação electrostática, prejudica a performance do sistema, uma vez que conforme a concentração aumenta, a supressão de corrente no recirculador aumenta também.

Tendo isto presente, fica evidente que para este tipo de casos é sempre necessário fazer um desenho caso a caso, envolvendo um processo de optimização entre o desenho do sistema e das respectivas condições operatórias, não sendo possível generalizar qual a configuração óptima para todos os casos.

Em termos de previsão da eficiências globais, fica uma vez mais evidente que o modelo de Smolik com $k = 0.18$ não tem aplicação universal, uma vez que prevê por defeito para o caso a mais baixa queda de pressão, ainda que preveja bem para o caso a mais elevada queda de pressão. No entanto, o modelo PACyc consegue prever bastante bem a eficiência global para ambas as condições experimentais apresentadas, apresentando-se como alternativa para a simulação com recirculação electrostática, com eléctrodo simples.

5.6 Síntese do capítulo

O propósito deste capítulo era validar a capacidade de previsão do modelo PACyc do sistemas Hurricane, ReCyclone[®] MH e ReCyclone[®] EH.

Tendo começado por apresentar o sistema estudado, os seus principais constituintes e respectivas variáveis mais relevantes, neste capítulo apresentaram-se vários casos de estudo, onde o sistema (nas suas várias configurações possíveis) levou a resultados que permitem concluir que tem um comportamento reprodutível e que é expectável que nas mais variadas situações tenha resultados de qualidade.

Para cada um destes ensaios foram feitas previsões usando o modelo PACyc, no sentido de mostrar que este modelo tem a capacidade de prever razoavelmente situações muito diversas, sendo por isso o modelo, que até à data, melhor descreve estes sistemas.

No entanto, embora consiga prever bastante bem as eficiência globais finais do sistema, o modelo não consegue prever as curvas de eficiência fraccional com a forma característica de gancho, sendo que as prováveis razões para isso são:

- Para distribuições de tamanho de partículas realistas, como as que são utilizadas neste trabalho, existe uma clara insuficiência quer em termos de poder computacional (CPU) quer em termos de memória para representar completamente as distribuições que dão entrada no sistema. Na verdade, (Ho e Sommerfeld, 2002) mostram que, para partículas inferiores a 2 μm , considerando o fenómeno de aglomeração interparticular, a frequência em número destas partículas tende para zero. No entanto, as distribuições utilizadas por estes autores não correspondem a distribuições de tamanho de partículas em volume realistas presentes na prática industrial;
- Poderá o campo de velocidade dentro do ciclone ser de tal forma que exista o arrastamento em grandes vórtices das partículas mais finas em direcção à parede do ciclone, o que implicaria que estas tenham uma captura anormalmente elevada, mesmo sem que o seu diâmetro aumentasse;
- Poderá existir ainda algum mecanismo extra responsável pela aglomeração das partículas finas, como as forças eléctricas resultantes de um carregamento das partículas na tubagem à entrada (como propõe Hoffmann e Stein (2002)), sendo que estes fenómenos não são actualmente considerados no modelo.

Apresentaram-se ainda algumas limitações do sistema físico modelizado, dando particular destaque ao caso com recirculação electrostática, uma vez que neste caso, embora o aumento da concentração favoreça a separação das partículas no ciclone, prejudica a separação das partículas no recirculador, uma vez que conforme se aumenta a concentração, a supressão de corrente é cada vez maior.

Nomenclatura

Caracteres romanos

A	Parâmetro de ajuste do modelo
B	Parâmetro de ajuste do modelo
C	Parâmetro de ajuste do modelo
C_{in}^{PTN}	Concentração à entrada em base seca e condições PTN (kg/Nm^3)
C_{out}^{PTN}	Concentração à saída em base seca e condições PTN (kg/Nm^3)
C_0	Concentração a montante do sistema (kg/m^3)
$C_0(d_p)$	Concentração a montante do sistema das partículas com diâmetro d_p (kg/m^3)
C_0^*	Concentração que entra no ciclone (kg/m^3)
C_1	Concentração da corrente de captura (kg/m^3)
C_2	Concentração que escapa do ciclone (kg/m^3)
C_3	Concentração a jusante do sistema (kg/m^3)
$C_3(d_p)$	Concentração a jusante do sistema das partículas com diâmetro d_p (kg/m^3)
C_p	Concentração de pó na zona da amostragem (kg/m^3)
C_R	Concentração da corrente que recircula (kg/m^3)
D	Diâmetro da tubagem de entrada e saída do sistema (m)
D_{sonda}	Diâmetro do bocal das sondas de amostragem (mm)
G_{in}^b	Concentração GRIMM à entrada pré-processamento (mg/m^3)
G_{in}^p	Concentração GRIMM à entrada pós-processamento (mg/m^3)
G_{out}^b	Concentração GRIMM à saída pré-processamento (mg/m^3)
G_{out}^p	Concentração GRIMM à saída pós-processamento (mg/m^3)
i_{final}	Intensidade de corrente obtida quando o sistema está a operar (mA)
$i_{inicial}$	Intensidade de corrente obtida quando o sistema está limpo (mA)
m_{filtro}	Massa de pó retida no filtro após amostragem isocinética (mg)
$\overline{M}$	Massa molar média do fluido (kg/mol)
M_{H_2O}	Massa molar da água (kg/mol)
M_{N_2}	Massa molar de azoto gasoso (kg/mol)
M_{O_2}	Massa molar de oxigénio gasoso (kg/mol)
m_{sonda}	Massa de pó retida na sonda após amostragem isocinética (mg)
P	Pressão na toma de amostragem (kPa)
P_{atm}	Pressão atmosférica (kPa)
$P_{oper,in}$	Pressão de operação à entrada (kPa)
$P_{oper,out}$	Pressão de operação à saída (kPa)
P_{oper}	Pressão de operação (kPa)
$Q^{*,r}(r)$	Caudal volumico de fluido em função da posição radial r , em base seca e condições PTN (Nm^3/h)

$Q'(r)$	Caudal volúmico de fluido em função da posição radial r usando a velocidade calculada, em base seca e condições PTN (Nm^3/h)
$\overline{Q'_{amostrado}}$	Caudal volúmico efectivamente amostrado em base seca e condições PTN (Nm^3/h)
$\overline{Q'_{sonda}}$	Caudal volúmico médio amostrado (m^3/h)
$Q'_{sonda}(r)$	Caudal a ser amostrado pela sonda isocinética em função da posição radial r , em base seca e condições PTN (m^3/h)
$Q_{in,medio}$	Caudal volúmico médio de fluido à entrada no ciclone (m^3/h)
$Q_{in,modelo}$	Caudal volúmico de fluido à entrada no ciclone previsto pelo modelo de ajuste (m^3/h)
Q_{in}	Caudal volúmico de fluido à entrada no ciclone (m^3/h)
Q_{medio}	Caudal volúmico médio de fluido à saída do sistema (m^3/h)
Q_{modelo}	Caudal volúmico de fluido à saída do sistema previsto pelo modelo de ajuste (m^3/h)
$Q_{out,po}$	Caudal volúmico de pó alimentado (cm^3/h)
Q_{out}	Caudal volúmico de fluido à saída do sistema (m^3/h)
$Q_{sonda}(r)$	Caudal a ser amostrado pela sonda isocinética em função da posição radial r (m^3/h)
R	Constante dos gases perfeitos (J/K/mol)
r	Posição radial na tubagem (m)
R	Raio da tubagem (m)
$Sup(\%)$	Percentagem de supressão de corrente (%)
T	Temperatura absoluta (K)
$T(^{\circ}\text{C})$	Temperatura de operação ($^{\circ}\text{C}$)
$\overline{T_{amb}}$	Temperatura ambiente média ($^{\circ}\text{C}$)
$\overline{T_{oper}}$	Temperatura de operação média ($^{\circ}\text{C}$)
$t_{amostragem}$	Tempo de amostragem (min)
$U(r)$	Velocidade do fluido na posição radial r (m/s)
$U_{central}$	Velocidade central do fluido na tubagem (m/s)
U_{media}	Velocidade média do fluido na tubagem (m/s)
$V_{amostrar}$	Volume a amostrar para condições isocinéticas (cm^3)
V_p	Frequência de operação do ventilador principal (Hz)
V_{recir}	Frequência de operação do ventilador de recirculação (Hz)
$\overline{W}$	Caudal mássico médio de fluido (kg/h)
W_{medio}	Caudal mássico médio de fluido à saída do sistema (kg/h)
W_{modelo}	Caudal mássico de fluido à saída do sistema previsto pelo modelo de ajuste (kg/h)
W_{out}	Caudal mássico de fluido à saída do sistema (kg/h)
$W_{p,in}$	Caudal mássica de pó à entrada (mg/h)

$W_{p,out}$	Caudal mássica de pó à saída (mg/h)
W_p	Caudal mássico de pó (mg/s)

Caracteres gregos

ΔP	Queda de pressão (kPa)
$\Delta P(r)$	Diferença de pressão entre a posição radial r e a pressão atmosférica (kPa)
$\Delta P_{ciclone}$	Queda de pressão no ciclone (kPa)
ΔP_{recir}	Queda de pressão no recirculador (kPa)
ΔP_{total}	Queda de pressão total no sistema (kPa)
η	Eficiência global
$\eta(d_p)$	Eficiência fraccional do diâmetro d_p
ρ	Massa volúmica do fluído (kg/m ³)

Grandezas percentuais

% H_2O	Percentagem molar de água no fluido (%)
% Hum	Percentagem molar de humidade atmosférica (%)
% $in(d)$	Percentagem de partículas de diâmetro d à entrada (%)
% N_2	Percentagem molar de azoto no fluido (%)
% O_2	Percentagem molar de oxigénio no fluido (%)
% $out(d)$	Percentagem de partículas de diâmetro d à saída (%)

Capítulo 6

Estudos preliminares da geometria do eléctrodo de descarga

Sumário do Capítulo

Este Capítulo pretende mostrar os ensaios preliminares de optimização da geometria do eléctrodo.

São apresentadas as curvas de potencial vs. corrente (curvas características) para as diversas geometrias estudadas, assim como um ensaio a muito baixa concentração com fumos de incenso no sentido de testar de uma forma rápida e simples diversas geometrias de eléctrodos.

Por fim, e no sentido de tentar retirar algumas conclusões fundamentadas, é feito um ensaio comparativo com um dos casos apresentados no Capítulo 5.

Como já foi referido anteriormente, as características geométricas do sistema de ciclones estão bem definidas e encontram-se optimizadas e protegidas por diversas patentes. No entanto um dos objectivos inicialmente traçados neste doutoramento passa por fazer um estudo do impacto da geometria do eléctrodo na eficiência de captura do sistema. No sentido de testar o impacto desta geometria nos resultados finais, foram definidas seis geometrias de eléctrodo, para tentar optimizar a performance do sistema quando este opera com recirculação electrostática.

Para tornar mais evidente as restrições nas adaptações das diversas geometrias dos eléctrodos, na Figura 6.1 são identificados os pontos de apoio disponíveis dentro do recirculador para cada um dos tipos de eléctrodo estudado. Na zona posterior temos como ponto de apoio uma superfície troncocónica enquanto que na saída (parte anterior da figura) temos um anel de encaixe, com diâmetro igual ao da saída de ar para a

chaminé. Neste anel temos ainda uma cruzeta de forma a que seja possível prender o eléctrodo no ponto central do anel.

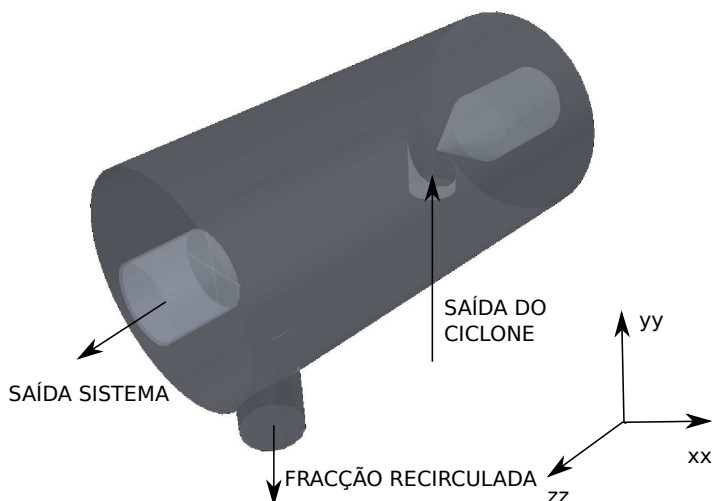


Figura 6.1 Geometria do recirculador e posicionamento dos pontos de apoio dos diferentes eléctrodos

De forma a clarificar o percurso que o ar e as partículas por ele arrastadas (vindas do ciclone) fazem no recirculador, estes entram pelo tubo na parte posterior da figura, circulam pelo recirculador no sentido positivo do eixo dos zz e na zona de saída o gás e as partículas dividem-se em função das condições operatórias: parte recircula para o ciclone pelo tubo de saída voltado para baixo e o restante sai pelo tubo central para a chaminé de saída do sistema.

6.1 Geometrias de eléctrodo estudadas

Tendo presente as estruturas disponíveis para encaixe dos diferentes eléctrodos, apresentam-se nas Figuras 6.2, 6.3 e 6.4 esquemas simplificados de cada uma das geometrias estudadas neste trabalho.

6.1.1 Eléctrodos simples

Uma característica destes eléctrodos simples, é que estes obedecem de uma forma directa aos princípios enunciados na Secção 2.4, uma vez que nesta geometria os eléc-

trodos são presos dentro do ciclone no fundo da estrutura troncocónica até ao ponto central da cruzeta na saída.

Com isto consegue-se um eléctrodo cilíndrico central, num recirculador com superfície cilíndrica, garantindo por isso a simetria cilíndrica que está por trás das simplificações feitas para as equações anteriormente apresentadas. As suas curvas características são assim fáceis de prever.

De uma forma muito sintética, é possível presumir que conforme se aumente o diâmetro do eléctrodo que o potencial de início de Corona aumente (conforme a equação 2.77), a intensidade de corrente diminua (conforme a equação 2.85), e que o campo eléctrico no fluido que rodeia o eléctrodo diminua (conforme a equação 2.86).

Além disso, com esta geometria é expectável que se favoreça o carregamento das partículas junto ao centro do recirculador, sendo de referir que no sentido de maximizar a Corona, dever-se-ia optar por um diâmetro de eléctrodo menor, havendo no entanto limitações no que diz respeito à resistência mecânica deste. A melhor resistência foi obtida com um eléctrodo de Cr-Ni.

A performance deste tipo de eléctrodos será apresentada na Figura 6.7 e discutida posteriormente.

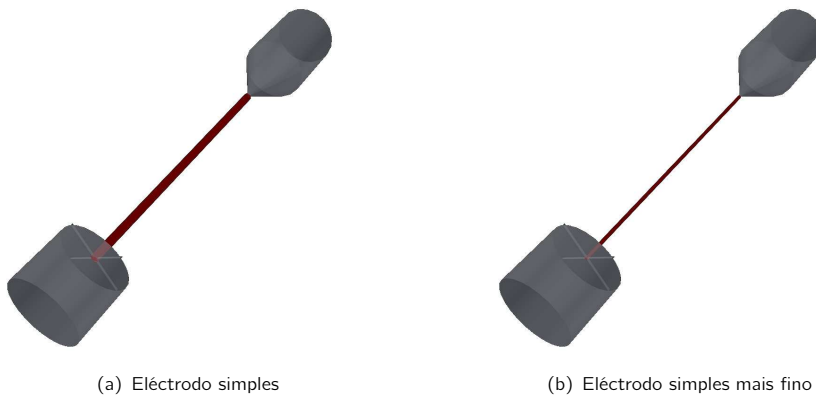


Figura 6.2 Geometrias dos eléctrodos simples estudadas

6.1.2 Eléctrodos múltiplos

Tentando maximizar a emissão de iões (intensidade de corrente), optou-se por estudar o impacto do eléctrodo ser constituído por vários fios, no sentido de os colocar

mais perto das paredes do recirculador, assim como influenciar mais moléculas de gás simultaneamente.

Assim, foram feitos dois estudos considerando duas disposições espaciais diferentes, levando ainda em linha de conta que o número de fios que as distingue é o dobro, pretendendo-se perceber se o aumento do número de fios melhoraria a performance do eléctrodo, ou se por outro lado prejudicaria.

As duas geometrias dos eléctrodos múltiplos estudadas passaram por um eléctrodo composto por três fios simples em triângulo (apresentada na Figura 6.3(a)) e por seis fios simples adoptando uma forma similar a um elipsóide (apresentada na Figura 6.3(b)). Além disso, este eléctrodo tem um anel central para reforçar a resistência mecânica.

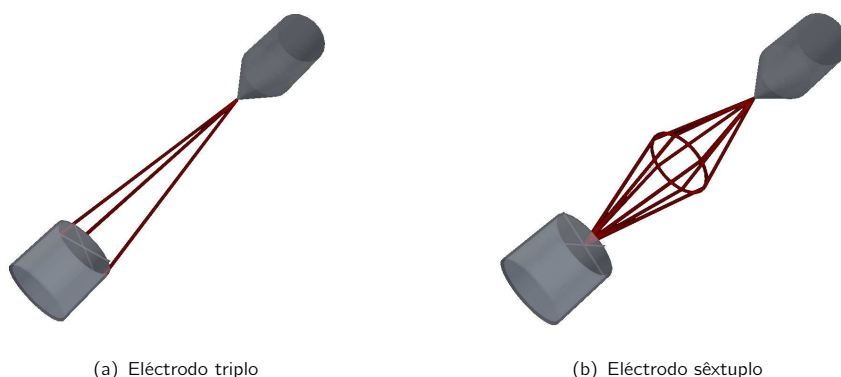


Figura 6.3 Geometrias dos eléctrodos múltiplos estudadas

Este tipo de eléctrodos teriam, à partida, a tendência a favorecer o campo eléctrico perto das paredes do recirculador, permitindo que as partículas sejam mais facilmente carregadas.

De forma a tentar prever o comportamento destas geometrias não comuns, poder-se-á considerar este tipo de eléctrodo como um eléctrodo composto por um fio central com um diâmetro e comprimento equivalentes, ainda que esta possa ser uma aproximação muito rudimentar.

No entanto, considerando válida esta simplificação, é possível induzir que este eléctrodo equivalente terá um diâmetro maior do que os eléctrodos isolados, levando por isso a que o potencial de início de Corona seja maior.

Além disso, como estes eléctrodos têm uma zona central onde não existe nenhuma superfície de eléctrodo, esta inexistência implica que os campos gerados por cada um dos seus fios constituintes interajam, o que se traduz num anulamento provável do campo

eléctrico em várias zonas do espaço, não carregando as partículas que se encontram no centro do recirculador.

Estas hipóteses serão validadas após a análise da Figura 6.8.

6.1.3 Eléctrodo com estrutura de arame farpado

Tendo presentes as hipóteses apresentadas para cada uma das geometrias previamente referidas, empiricamente o eléctrodo óptimo deverá ter as seguintes características.

- Ser o mais fino possível, de forma a iniciar a geração de Corona ao potencial mais baixo possível;
- Estar o mais próximo das paredes possível, de forma a aumentar o campo eléctrico;
- Apresentar uma boa resistência mecânica de forma a garantir um “scale-up” do sistema para a escala industrial;
- Não apresentar uma zona central, onde o campo eléctrico se anule devido a interacção entre os vários fios que constituam o eléctrodo;
- Apresentar características de condução eléctrica favoráveis;

Uma geometria que leva em linha de conta alguns dos princípios teóricos apresentados, é a geometria tipo arame farpado, e apresenta-se uma representação esquemática na Figura 6.4. Ainda que existam várias variáveis na configuração geométrica do arame farpado (espaçamento entre farpas, comprimento das farpas, acabamento das farpas, etc.) optou por se fazer um teste com um arame farpado comercial.

Esta geometria parece aproximar-se de uma geometria óptima, uma vez que apresenta um fio na zona central a favorecer a melhor carga das partículas na parte do centro, as farpas a aproximarem-se da parede do recirculador permitem que o campo gerado perto das paredes seja mais forte, e inerentemente o arame farpado tem uma boa resistência mecânica.

Foram estudados dois tipos de arame farpado, sendo possível referir que a característica que os diferenciava era apenas o diâmetro do fio que os constituíam.

A performance deste tipo de eléctrodos será apresentada na Figura 6.9 e discutida posteriormente.

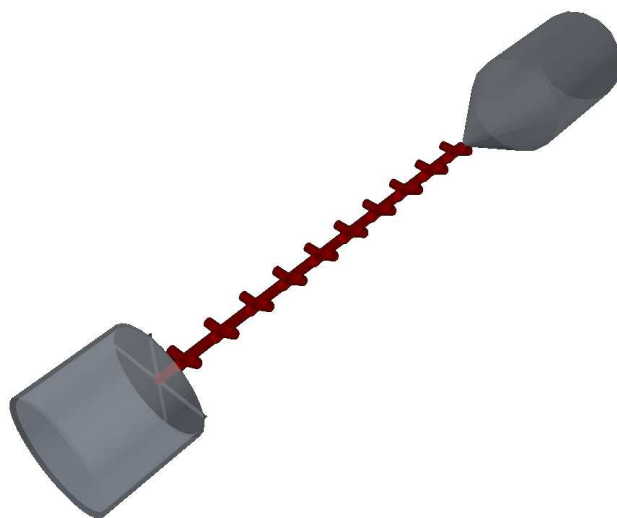


Figura 6.4 Geometria tipo dos eléctrodos baseados em arame farpado estudadas

6.1.4 Eléctrodos de alta emissão - Pipe and Spike

No sentido de testar geometrias de eléctrodos usados nos precipitadores electrostáticos de placas paralelas, foram ainda estudados eléctrodos de alta emissão, referenciados na literatura por eléctrodos tipo *Pipe and Spike* (ou tubo e farpas).

Analisando a constituição deste tipo de eléctrodos à luz dos princípios empíricos enunciados para o eléctrodo óptimo para este sistema, os eléctrodos tipo *Pipe and Spike* apresentam de uma forma muito sucinta as seguintes características:

- O tubo central funciona como suporte para as farpas, sendo que devido ao seu raio muito superior ao das farpas, não ioniza as moléculas de gás que com ele estão em contacto;
- Com a presença das farpas, à semelhança dos eléctrodos de arame farpado, este eléctrodo está mais próximo das parede do recirculador, aumentando o campo eléctrico junto da parede;
- Apresentam uma boa resistência mecânica, uma vez que o tubo central é robusto e garante um “scale-up” simples do sistema para a escala industrial.

Ainda que à semelhança do arame farpado existam várias variáveis na sua configuração (espaçamento entre farpas, comprimento das farpas, acabamento das farpas, etc.)

optou por se fazer um teste com eléctrodos comerciais.

No entanto, no sentido de averiguar o impacto da disposição espacial das farpas, foram estudadas quatro geometrias *Pipe and Spike* diferentes. Estas são apresentadas na Figura 6.5, para um número de farpas variável.

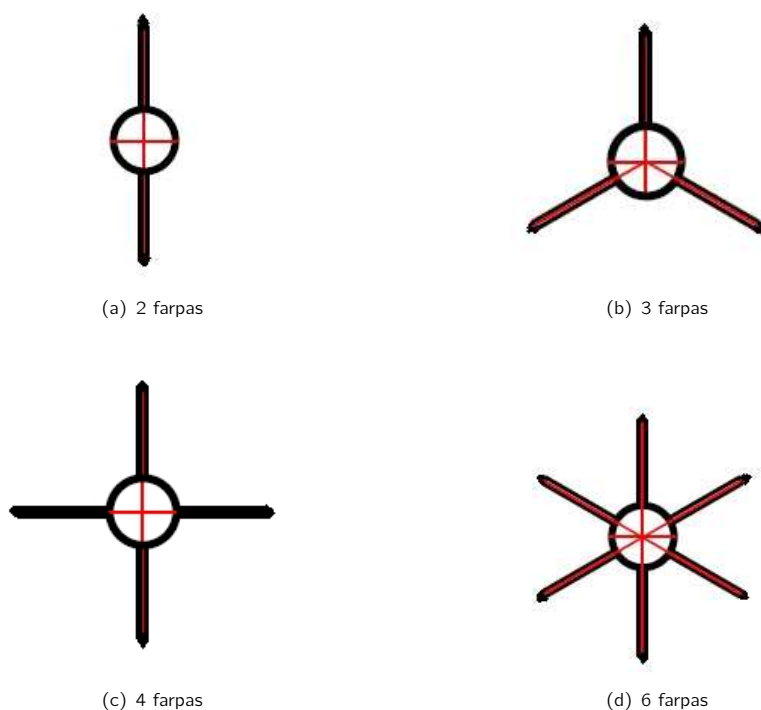


Figura 6.5 Geometrias dos eléctrodos de alta emissão (*Pipe and Spike*) estudadas

Em todos os casos, as farpas estão colocadas à mesma cota (na mesma posição axial).

Esta geometria é apresentada esquematicamente na Figura 6.6, em que é apresentado como exemplo o caso com 3 farpas, sendo que a vermelho estão identificadas as zonas do eléctrodo que carregam as partículas.

A performance deste tipo de eléctrodos será apresentada na Figura 6.10 e discutida posteriormente.

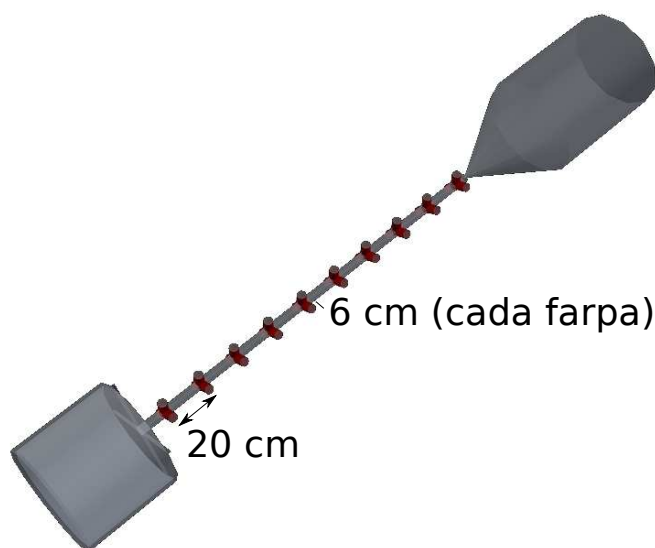


Figura 6.6 Geometria tipo dos eléctrodos baseados em arame farpado estudadas

6.2 Avaliação da performance de cada geometria

Uma forma directa de avaliar a performance de cada uma das geometrias dos eléctrodos estudados, é a determinação da curva de eficiência fraccional do sistema a operar com recirculação electrostática. Tendo presente que a eficiência de captura do sistema é função do tipo de amostra processada, para observar isoladamente o impacto da geometria dos eléctrodos nos resultados finais, optou-se por fazer uma avaliação da performance do sistema em função da curva potencial-corrente de cada um dos eléctrodos, tomando por válida a hipótese em que quanto maior for a corrente gerada, mais partículas são carregadas e melhor será a performance do sistema. Esta hipótese será alvo de discussão adiante.

As curvas características obtidas para cada eléctrodo simples são apresentadas na Figura 6.7, para cada eléctrodo múltiplo são apresentadas na Figura 6.8, para cada eléctrodo tipo arame farpado são apresentadas na Figura 6.9 e para cada eléctrodo de alta emissão são apresentadas na Figura 6.10 e os eléctrodos com os quais foram realizadas experiências estão identificados com um cardinal (#).

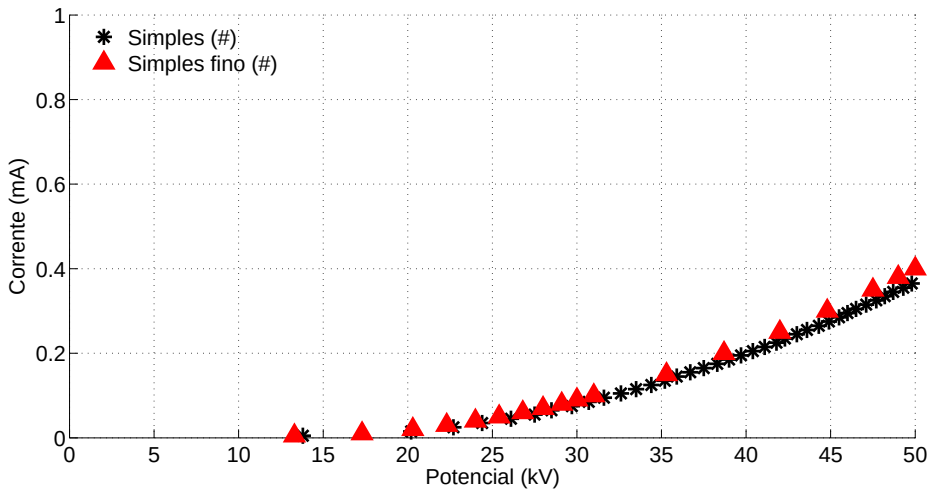


Figura 6.7 Curvas características para os eléctrodos simples

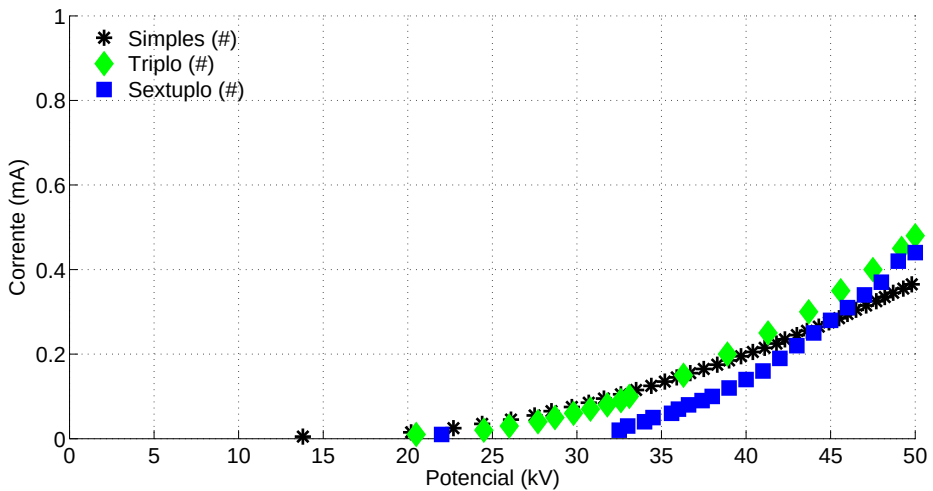


Figura 6.8 Curvas características para os eléctrodos múltiplo

Analisando em maior detalhe as Figuras 6.7, 6.8, 6.9 e 6.10, é possível afirmar que:

- O eléctrodo que tem o início de Corona a potencial mais elevado é o eléctrodo múltiplo composto por 6 fios e este facto está de acordo com o anteriormente referenciado, uma vez que se este eléctrodo múltiplo for traduzido por um eléctrodo equivalente simples de diâmetro equivalente, é previsível que a Corona comece a

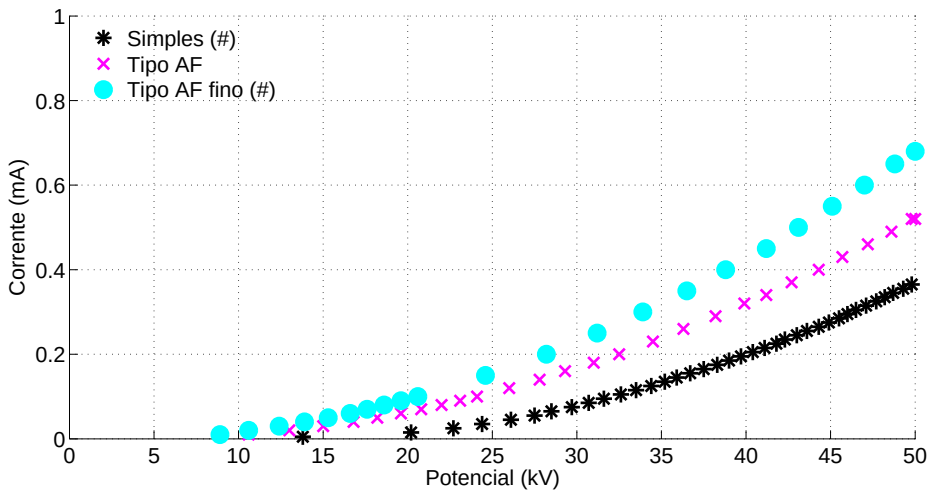


Figura 6.9 Curvas características para os eléctrodos tipo arame farpado

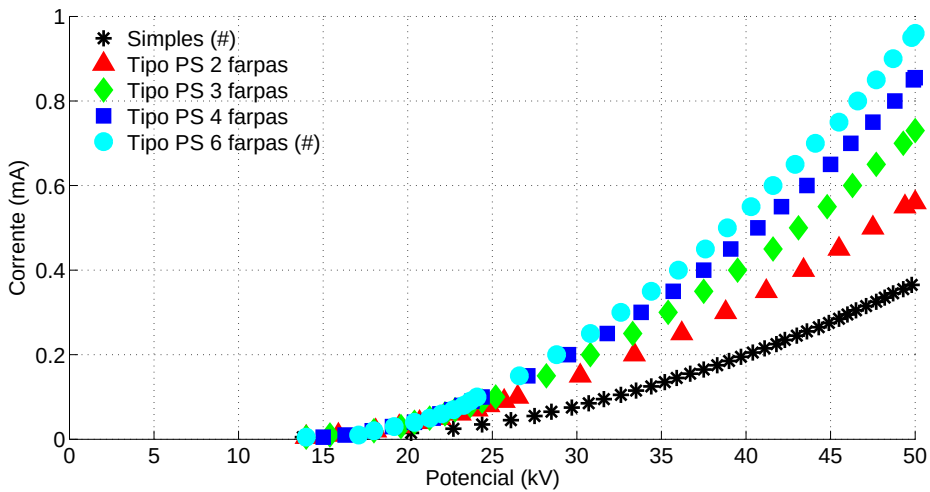


Figura 6.10 Curvas características para os eléctrodos de alta emissão (*Pipe and Spike*)

um potencial mais elevado;

- O eléctrodo que tem o início de Corona a potencial mais baixo é o eléctrodo com geometria tipo arame-farpado mais fino, facto que está de acordo com o anteriormente referido;
- Focando o comportamento dos eléctrodos em termos de valor da variação da

intensidade de corrente em função da variação do potencial, ou mais simplesmente, analisando a derivada de cada curva, é possível afirmar que no caso do eléctrodo múltiplo com seis fios esta apresenta uma curva característica com elevado declive, podendo indicar que para valores de potencial equivalentes, este sistema tenha uma performance melhor;

- Para o caso dos eléctrodos múltiplos, com estrutura de arame farpado ou tipo *Pipe and Spike* estudados, tendo em conta que foram feitas aproximações rudimentares para a obtenção das suas respectivas curvas potencial vs. corrente¹, não se considera conservativo fazer previsões do funcionamento do sistema com estes eléctrodos. Assim sendo, por esta razão não serão apresentadas as previsões teóricas para outras geometrias de eléctrodo que não a geometria simples, para qualquer dos ensaios experimentais apresentados adiante neste capítulo;
- Para os eléctrodos tipo *Pipe and Spike* são obtidas correntes maiores do que para qualquer outro tipo de eléctrodo.

Comparando os eléctrodos com estruturas similares dois a dois, pode-se dizer que:

- Para o caso dos **eléctrodos simples**, as performances dos eléctrodos são muito similares, sendo no entanto possível afirmar que o eléctrodo com menor diâmetro apresenta ligeiramente melhores resultados, tendo, conforme o previsto, um potencial de início de Corona mais baixo assim como uma corrente ligeiramente superior à do eléctrodo com diâmetro maior;
- Para o caso dos **eléctrodos múltiplos**, o eléctrodo com menos fios tem um comportamento melhor, isto é, com um potencial de início de Corona mais baixo e com uma intensidade de corrente mais elevada do que o eléctrodo de seis fios para o mesmo potencial.
- Para o caso dos **eléctrodos tipo arame farpado**, embora tenham potenciais de início de Corona similares, o eléctrodo de menor diâmetro tem uma corrente bastante superior do que o de diâmetro maior para o mesmo potencial.
- Em relação aos **eléctrodos tipo Pipe and Spike**, estes apresentam uma intensidade de corrente crescente conforme se aumenta o número de farpas, o que poderá

¹Para tal, foram feitas alterações dos parâmetros de entrada do modelo PACyc mobilidade iónica e factor de fricção, de forma a que a curva potencial vs. corrente se aproximasse o mais possível da respectiva curva experimental para cada um dos eléctrodos. No entanto, esta aproximação não se considerou suficientemente validada para se apresentar neste trabalho.

indicar que este tipo de eléctrodo produzirá tanta mais corrente, quanto mais próximo de um disco for a superfície que ioniza as moléculas de gás. No entanto, para o sistema estudado, esta situação limite do número de farpas ser tal que se aproxime a um disco levará a perdas de carga muito mais elevadas dentro do recirculador, não parecendo por isso interessante testar eléctrodos com maior número de farpas;

Analisando as curvas características, apresenta-se na Tabela 6.1 a informação mais relevante acerca de cada um dos eléctrodos testados.

Tabela 6.1 Potencial de início de Corona e intensidade de corrente máxima dos eléctrodos usados nas experiências efectuadas neste trabalho

Tipo de Eléctrodo	Potencial de Início Corona (kV)	Intensidade de corrente a 50 kV (mA)
Simples (0.8 mm)	13.8	0.365
Simples (0.7 mm)	13.3	0.400
Trifilar	20.5	0.480
Multifilar	22.0	0.440
Arame farpado (0.7 mm)	8.9	0.680
Arame farpado (1.5 mm)	10.6	0.520
<i>Pipe and Spike 2</i>	14.0	0.560
<i>Pipe and Spike 3</i>	14.0	0.730
<i>Pipe and Spike 4</i>	15.0	0.855
<i>Pipe and Spike 6</i>	14.0	0.960

6.3 Ensaios experimentais preliminares com fumos de incenso

No sentido de se fazerem ensaios simples de cada um dos tipos de eléctrodos, apresenta-se um caso de estudo com incenso.

À semelhança do caso apresentado na Secção 5.5.2, com este caso pretende-se ainda mostrar que o sistema é altamente eficiente mesmo a muito baixas concentrações, tendo neste caso ainda a capacidade de se controlar a concentração à entrada, ao contrário do caso de estudo com ar ambiente.

Como se operou a concentrações muito baixas e considerando que se tratam de ensaios experimentais preliminares, considerou-se que o sistema de medição GRIMM

conduziam a resultados de medição precisos, quer à entrada quer à saída do sistema.

6.3.1 Impacto do campo eléctrico nos sistemas com recirculação mecânica vs. recirculação electrostática

Com este caso pretende-se destacar o impacto da introdução do campo eléctrico no recirculador e comparar os resultados da recirculação mecânica com os da recirculação electrostática.

Condições de operação

Considerando as medições *online* feitas pelo GRIMM, foram estudadas duas condições operatórias diferentes: ciclone com recirculação mecânica e ciclone com recirculação (mecânica e) electrostática.

Ambos os ensaios foram realizados com o ventilador principal a operar a 33 Hz e o ventilador de recirculação a operar a 33 Hz (velocidade média de entrada de 15.3 m/s e velocidade média de saída de 7.5 m/s, quedas de pressão no ciclone 0.76 kPa e no sistema de 1.11kPa) e no caso com campo eléctrico, este foi obtido com fio simples de maior diâmetro (0.8 mm), tendo sido aplicado um potencial de 50 kV.

Não tendo sido usado o alimentador para introduzir partículas no sistema, uma vez mais são testadas as hipóteses avançadas no caso a muito baixa concentração, apresentado na Secção 5.5.2.

Caracterização das partículas

Para averiguar a reprodutibilidade da queima dos paus de incenso, foram efectuadas medições com 3 paus de incenso, tendo ainda sido comparada a performance do sistema com recirculação mecânica e com recirculação electrostática. O resultado da distribuição à entrada e das emissões são apresentados na Figura 6.11, sendo que a concentração à entrada foi $\approx 0.8\text{mg/m}^3$.

Analisando as distribuições apresentadas na Figura 6.11, é possível constatar que a mediana à entrada é $\approx 0.60\mu\text{m}$ e que não são alimentadas quaisquer partículas maiores do que $\approx 4.5\mu\text{m}$. As distribuições à saída são muito similares à da entrada, havendo apenas um ligeiro desvio da mediana à saída para $\approx 0.55\mu\text{m}$.

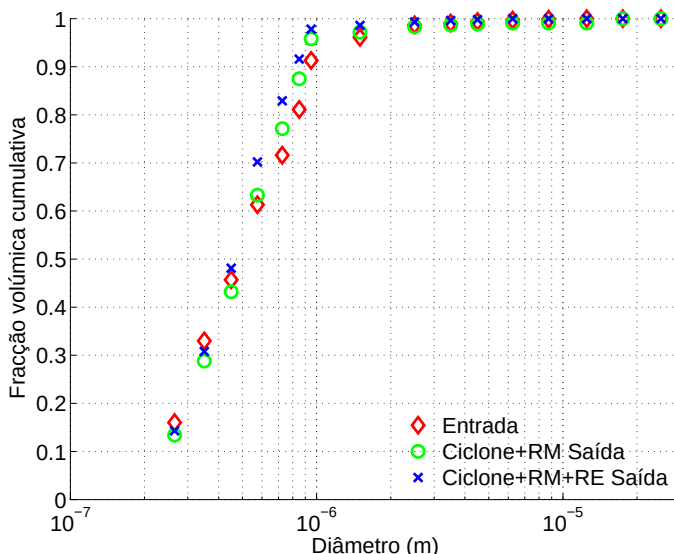


Figura 6.11 Distribuição de tamanho de partículas: entrada e emissões do caso com 3 paus de incenso

Curvas de Eficiência Fraccional

Na Figura 6.12 são apresentadas as curvas de eficiência fraccional das várias configurações estudadas, apresentando-se o caso com recirculação mecânica e o caso com recirculação electrostática.

Analisando a Figura 6.12, é possível constatar que ambas as curvas têm formas similares, tendo no entanto a curva com campo eléctrico valores consistentemente mais elevados do que a correspondente sem campo eléctrico.

Pelo apresentado, é possível induzir que a adição do campo eléctrico favorece de uma forma global a captura de partículas de todos os diâmetros.

Na Tabela 6.2 são apresentadas as eficiências globais correspondentes às eficiências fraccionais apresentadas na Figura 6.12.

Analisando os valores da eficiência global obtidos para estes ensaios, é de destacar que mesmo com uma concentração $\approx 0.8 \text{ mg/m}^3$ e tendo ainda presente que mesmo para amostras com medianas abaixo de $1 \mu\text{m}$, o sistema com recirculação electrostática consegue obter uma eficiência global acima de 91 %, o que vem comprovar a performance deste tipo de sistemas.

Assim sendo, justifica-se o facto de estudar uma forma de otimizar o funcionamento do campo eléctrico dentro do recirculador, sendo apresentado de seguida um caso de

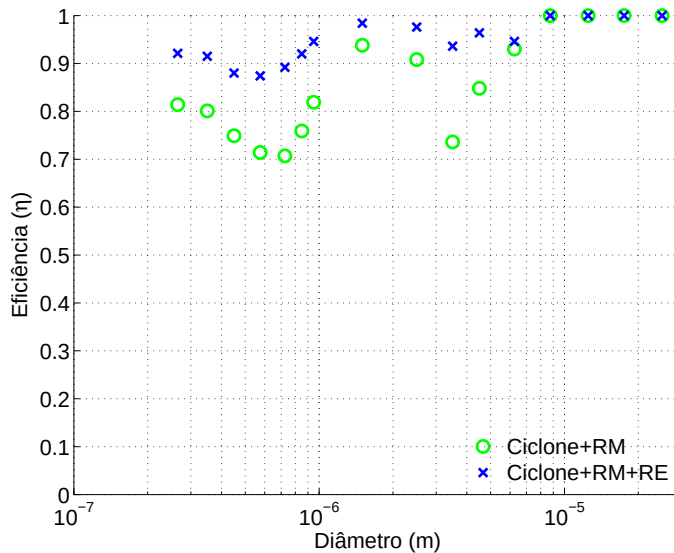


Figura 6.12 Curvas de Eficiência Fraccional das configurações estudadas: ciclone com recirculação mecânica e ciclone com recirculação mecânica e campo electrostático

Tabela 6.2 Eficiência global experimental para o caso com incenso

Ensaio	Experimental (%)
Ciclone + RM	77.9
Ciclone + RM + RE	91.2

estudo em condições similares ao caso com recirculação electrostática apresentado, onde se estudaram várias das geometrias de eléctrodos anteriormente referidas.

6.3.2 Estudo da geometria dos eléctrodos

Sendo este o tópico a destacar neste capítulo, apresenta-se um caso apenas com amostragem *online*, no sentido de evidenciar qual a performance do sistema em função do eléctrodo usado.

Seguindo a estrutura anterior aquando da apresentação dos ensaios experimentais, apresentam-se as condições de operação em que cada ensaio foi efectuado apresentando em seguida as distribuições cumulativas à entrada e saída para cada caso, terminando com a apresentação da curva de eficiência fraccional e a respectiva eficiência global.

Condições de operação

Estes ensaios foram realizados com o ventilador principal a operar a 30 Hz e o ventilador de recirculação a operar a 30 Hz (velocidade média de entrada de 14 m/s e uma velocidade média de saída de 8 m/s, quedas de pressão no ciclone 0.57 kPa e no sistema de 0.87 kPa).

Neste estudo foi feita uma análise do impacto de cada geometria do eléctrodo presente no recirculador, tendo sido aplicado um potencial de 50 kV, o que se traduz numa intensidade de corrente conforme se apresentou na Tabela 6.1.

Caracterização das partículas

Os resultados das distribuições de tamanho de partículas à entrada do sistema e as respectivas emissões para os vários casos são apresentadas nas Figuras 6.13.

Em particular, para o caso dos eléctrodos simples a informação é apresentada na Figura 6.13(a), para o caso dos eléctrodos multifilares na Figura 6.13(b), para o caso dos eléctrodos tipo arame farpado na Figura 6.13(c) e por último, para o caso dos eléctrodos tipo *Pipe and Spike* na Figura 6.13(d).

No sentido de sintetizar a informação apresentadas nas Figuras 6.13(a), 6.13(b), 6.13(c) e 6.13(d), na Tabela 6.3 apresentam-se a mediana e a percentagem de partículas submicrométricas quer à entrada quer à saída.

Analisando a Tabela 6.3 constata-se que a alimentação não foi reprodutível, sendo que a quantidade de partículas submicrométricas que são introduzidas no sistema variou entre 92.1% e 98.6%, o que por si só torna impossível uma comparação directa dos resultados obtidos, apresentando uma mediana representativamente menor para o caso *Pipe and Spike* 6.

Ainda assim, analisando as medianas à saída e as percentagem de partículas submicrométricas à saída, é possível constatar que os sistemas que apresentam uma performance melhor são o eléctrodo simples, o eléctrodo multifilar e o *Pipe and Spike* 6. No entanto este critério por si só não é esclarecedor, apresentando em seguida as respectivas curvas de eficiência fraccional e as equivalentes eficiências globais.

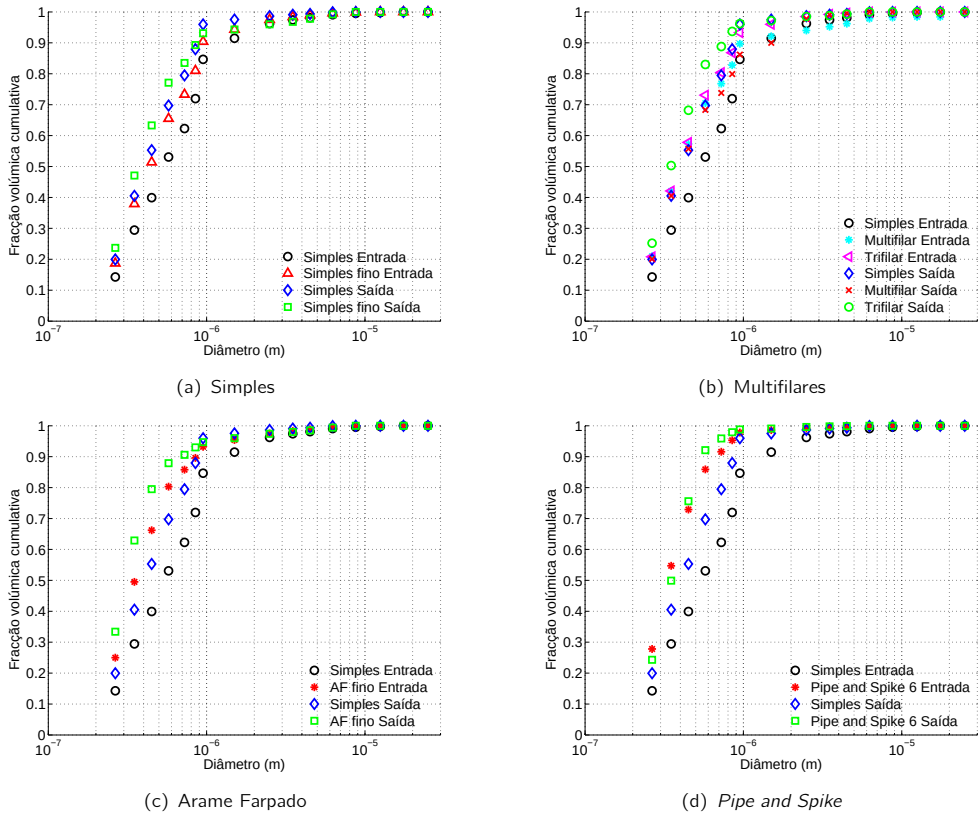


Figura 6.13 Distribuição de tamanho de partículas para cada uma das geometrias analisadas para o caso preliminar de incenso: à entrada e correspondentes emissões

Tabela 6.3 Mediana e percentagem de partículas submicrométricas das distribuições de tamanho de partículas à entrada para o caso do incenso com várias geometrias de eléctrodos

Ensaio	Entrada		Saída	
	$\widetilde{x}_{50}(\mu\text{m})$	$< 1\mu\text{m} (\%)$	$\widetilde{x}_{50}(\mu\text{m})$	$< 1\mu\text{m} (\%)$
Simples	≈ 0.35	≈ 92.1	≈ 0.36	≈ 90.0
Simples fino	≈ 0.39	≈ 94.3	≈ 0.32	≈ 94.3
Trifilar	≈ 0.35	≈ 96.0	≈ 0.30	≈ 97.2
Multifilar	≈ 0.35	≈ 92.1	≈ 0.36	≈ 90.0
Arame Farpado fino	≈ 0.30	≈ 95.4	≈ 0.27	≈ 96.0
Pipe and Spike 6	≈ 0.29	≈ 98.6	≈ 0.30	≈ 99.1
$\bar{x} \pm \text{i.c. } 95\%$	0.34 ± 0.04	-	0.32 ± 0.04	-

Curvas de Eficiência Fraccional

Os resultados das distribuições de tamanho de partículas à entrada no sistema e as respectivas emissões para os vários casos são apresentadas nas Figuras 6.14.

Em particular, para o caso dos eléctrodos simples a informação é apresentada na Figura 6.14(a), para o caso dos eléctrodos multifilares, na Figura 6.14(b), para o caso dos eléctrodos tipo arame farpado, na Figura 6.14(c) e por último, para o caso dos eléctrodos tipo *Pipe and Spike*, são apresentadas na Figura 6.14(d).

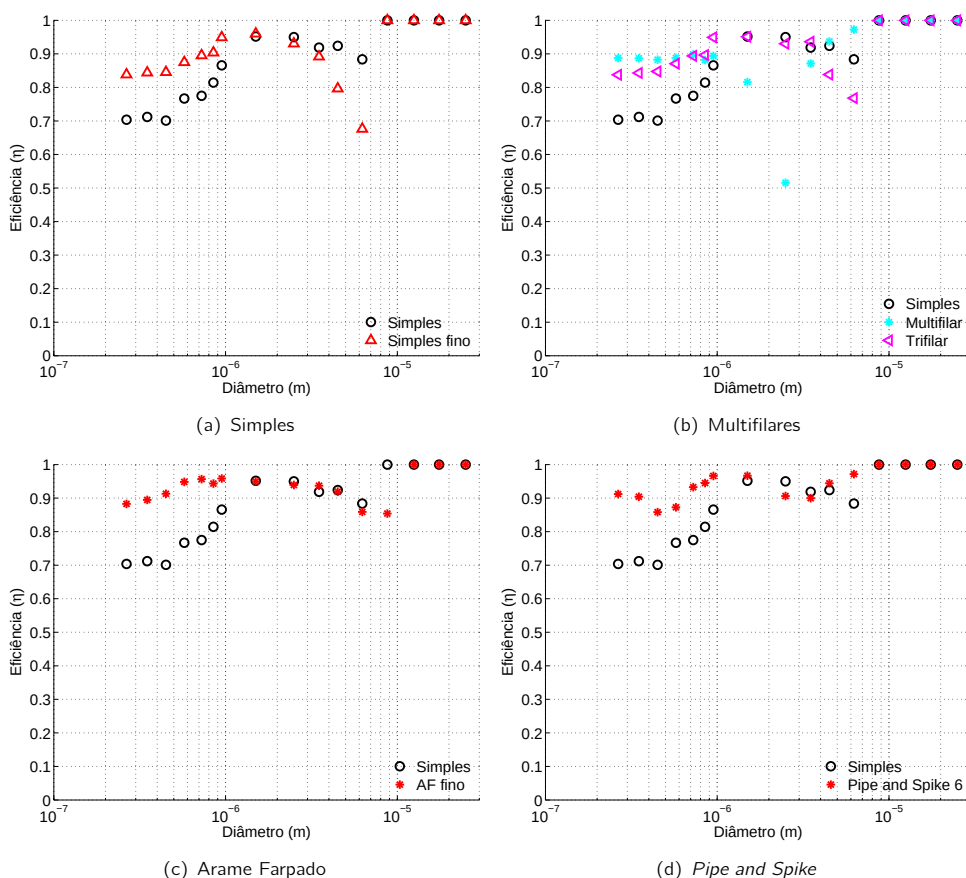


Figura 6.14 Curvas de eficiência fraccional para cada uma das geometrias analisadas para o caso preliminar de incenso

Em relação às curvas de eficiência fraccional apresentadas na Figura 6.14, é possível constatar que:

- A maioria dos eléctrodos, apresentam zonas com um vale muito pronunciado para partículas com diâmetro $\approx 7.5\mu\text{m}$, sendo que para o caso do eléctrodo multifilar o vale ocorre para um diâmetro $\approx 2.5\mu\text{m}$ e que o eléctrodo *Pipe and Spike* não apresenta um vale distinto na curva de eficiência fraccional;
- Todos os eléctrodos apresentam uma eficiência fraccional mais elevada do que o eléctrodo de referência para as partículas submicrométricas;
- Todos os eléctrodos têm eficiência de captura completa para partículas com diâmetros maiores do que $10\mu\text{m}$;

Às curvas de eficiência fraccional apresentadas nas Figuras 6.14(a), 6.14(b), 6.14(c) e 6.14(d), correspondem eficiências globais apresentadas na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 Eficiência global experimental para cada uma das geometrias estudadas

Ensaio	Experimental (%)
Simples	78.8
Simples fino	87.2
Trifilar	86.6
Multifilar	88.3
Arame Farpado fino	91.2
<i>Pipe and Spike 6</i>	89.9

Analisando a Tabela 6.4, é possível constatar que o sistema que apresentou melhor eficiência global foi o arame farpado fino ($\approx 91.2\%$), tendo conseguido uma redução nas emissões de $\approx 60\%$ relativamente ao caso base, que era o eléctrodo simples e que por sua vez apresentou a eficiência global mais baixa ($\approx 78.8\%$).

6.3.3 Conclusões do ensaio preliminar

Neste caso de estudo foi possível observar como se comporta o sistema a muitíssimo baixas concentrações ($\approx 0.8\text{mg}/\text{m}^3$) e constata-se uma vez mais, que este sistema consegue eficiências de captura $\approx 90\%$.

Tendo presente que este caso de estudo tem como propósito esclarecer qual o eléctrodo que implica melhor performance de captura de partículas, foi possível retirar algumas conclusões acerca de quais os eléctrodos que apresentam pior performance.

Assim sendo, tendo em conta quer a eficiência global, mas principalmente as curvas de eficiência fraccional apresentadas, ficam descartados como configuração óptima os

eléctrodos multifilares, principalmente pelos vales nas eficiência fraccionais muito pronunciados para partículas relativamente grandes.

No entanto, entre os outros dois tipos de eléctrodo usados, não é clara a conclusão a retirar acerca de qual se apresenta como a configuração óptima, uma vez que usando apenas a informação acerca das eficiências globais obtidas, a conclusão a retirar é que a configuração que obtém melhores resultados é com o arame farpado fino. No entanto, combinando as informações das eficiências globais com a das curvas de eficiência fraccional, é possível considerar que a conclusão acerca do eléctrodo que implica melhor eficiência não é clara.

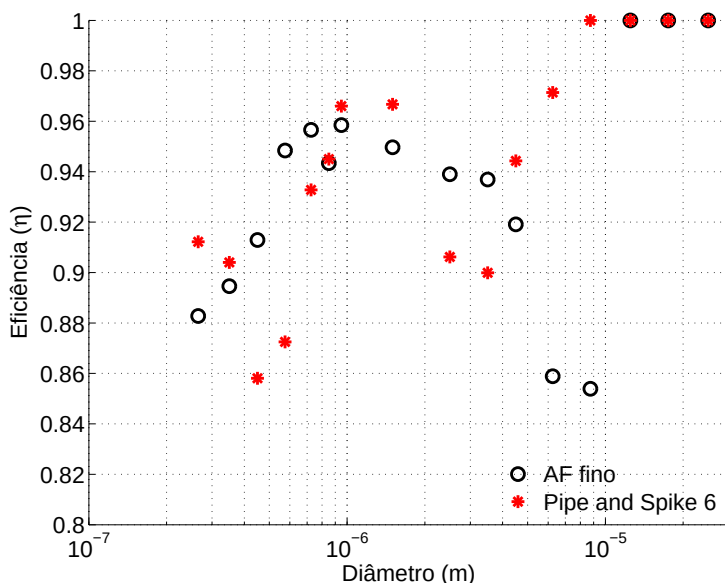


Figura 6.15 Detalhe das curvas de eficiência fraccional das geometrias que levaram a melhores resultados para o caso preliminar de incenso: arame farpado fino e *Pipe and Spike 6*

Fazendo uma comparação directa entre os duas geometrias que levaram aos melhores resultados, fica evidente após análise da Figura 6.15 que o eléctrodo de arame farpado leva a eficiências de captura menores para partículas com diâmetros de $\approx 8\mu\text{m}$, apresentando no entanto resultados semelhantes para partículas com diâmetros de $\approx 2 - 3\mu\text{m}$. Assim sendo, parece que a evidência aponta para uma melhor performance para o eléctrodo *Pipe and Spike*.

6.4 Ensaio experimental comparativo

No sentido de estimar a performance do sistema com recirculação electrostática em função do eléctrodo usado, foram feitas experiências com o mesmo pó e nas mesmas condições operatórias do ensaio apresentados nas Secções 5.5.6 e 5.5.7.

6.4.1 Caracterização das partículas

Muito sucintamente o pó analisado neste caso experimental tem uma massa volúmica real de $\rho_p = 2386 \text{ kg}_{\text{solido}}/\text{m}^3_{\text{solido}}$ e uma concentração à entrada de $\approx 0.8 \text{ g}/\text{m}^3$.

A distribuição que dá entrada no sistema é a equivalente à apresentada na Figura 6.16 pela série com círculos pretos, sendo que esta é a mesma distribuição apresentada anteriormente na Secção 5.5.6, tornando possível uma comparação directa de performance de separação em função do tipo de eléctrodo.

Na Figura 6.16 são ainda apresentadas as distribuições de tamanho de partículas à saída nas condições de quedas de pressão de 0.93kPa, enquanto que na Figura 6.17 se apresentam as saídas nas condições de quedas de pressão de 1.60kPa, sendo que em ambas as situações estas são obtidas não só através da medição *offline* mas também da medição *online*.

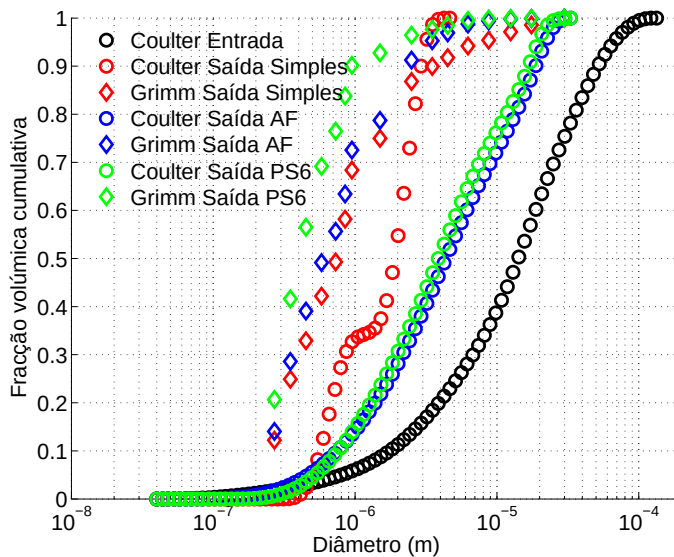


Figura 6.16 Distribuição de tamanho de partículas: entrada e emissões do sistema a 0.93 kPa

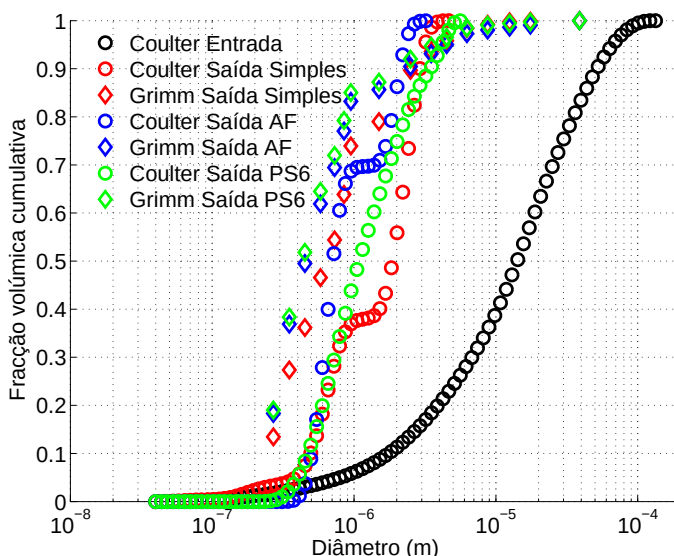


Figura 6.17 Distribuição de tamanho de partículas: entrada e emissões do sistema a 1.60 kPa

Analisando as Figuras 6.16 e 6.17, é possível constatar que a distribuição à entrada tem uma mediana $\approx 15\mu\text{m}$ e não apresenta partículas maiores do que $\approx 150\mu\text{m}$.

Em relação às distribuições à saída, é possível constatar que:

- As medições pelos métodos *online* dão resultados próximos entre si para todos os ensaios apresentados, embora a distribuição à saída relativa ao eléctrodo *Pipe and Spike* seja significativamente mais fina;
- A mediana à saída para o caso a 0.93kPa pelas medições *offline* foi $\approx 2.0\mu\text{m}$ para o caso do eléctrodo simples, $\approx 4.4\mu\text{m}$ para o caso do eléctrodo de arame farpado e $\approx 3.8\mu\text{m}$ para o caso do eléctrodo *Pipe and Spike*;
- A mediana à saída para o caso a 1.60kPa pelas medições *offline* foram $\approx 1.9\mu\text{m}$ para o caso do eléctrodo simples, $\approx 0.7\mu\text{m}$ para o caso do eléctrodo de arame farpado e $\approx 1.1\mu\text{m}$ para o caso do eléctrodo *Pipe and Spike*;
- Para as medições *offline*, o maior diâmetro nas emissões foi de $\approx 4.7\mu\text{m}$ para o eléctrodo simples, $\approx 3.5\mu\text{m}$ para o caso do eléctrodo de arame farpado e $\approx 5.9\mu\text{m}$ para o caso do eléctrodo *Pipe and Spike*;

Tendo presentes as limitações da medição *online* e baseando a análise da performance dos eléctrodos apenas na análise das medições *offline*, chegam-se a conclusões que vão

contra todos os ensaios efectuados anteriormente, ou seja, os novos eléctrodos não têm uma performance consistente e reprodutível.

Para o caso a 0.93 kPa, embora tenham uma performance melhor nas partículas submicrométricas, prejudicam sobremaneira a captura das partículas substancialmente maiores, sendo que é completamente anormal a presença de partículas de diâmetro de $\approx 33\mu\text{m}$ nas emissões. Este facto será mais evidente nas curvas de eficiência fraccional que serão apresentadas na Figura 6.18.

Para o caso a 1.60 kPa, ambos os eléctrodos apresentam uma performance melhor nas partículas submicrométricas, tendo no caso o *Pipe and Spike* um comportamento similar ao eléctrodo de referência na captura das partículas grandes, facto este que será mais evidente nas curvas de eficiência fraccional apresentadas na Figura 6.19.

6.4.2 Curvas de Eficiência Fraccional

Na Figura 6.18 apresentam-se as curvas de eficiência fraccional para o caso com perdas totais de pressão de 0.93 kPa.

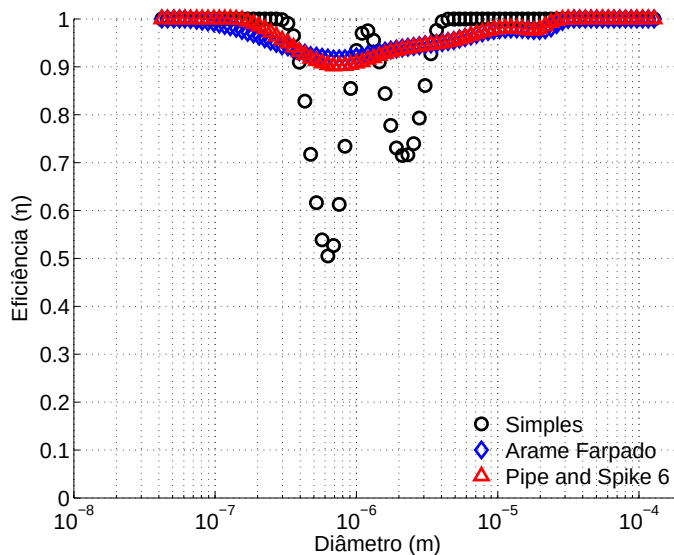


Figura 6.18 Curvas de Eficiência Fraccional a 0.93 kPa

Analisando a Figura 6.18, constata-se que o eléctrodo simples tem um comportamento diferente em relação aos eléctrodos de arame farpado e *Pipe and Spike*.

O eléctrodo simples apresenta uma curva de eficiência fraccional com dois vales para

partículas com diâmetros de $\approx 0.6\mu\text{m}$ e $\approx 2.0\mu\text{m}$, apresentando captura total para partículas menores do $\approx 0.6\mu\text{m}$ e maiores do que $\approx 4.0\mu\text{m}$.

Este tipo de comportamento é típico de todas as análises prévias com o eléctrodo simples, uma vez que existe sempre uma gama de diâmetros onde o sistema tem um vale de captura (referido neste trabalho como curvas de eficiência fraccional em forma de gancho), e que para diâmetros mais à esquerda, o sistema tem captura muito elevada e para diâmetros mais à direita do vale o sistema tem captura completa.

Por outro lado analisando os resultados obtidos para os eléctrodos tipo arame farpado e *Pipe and Spike*, estes apresentam comportamentos similares entre si.

Embora apresentem captura completa para as partículas muito pequenas, o sistema com estes dois eléctrodos apresenta um vale onde a captura mínima de partículas é menor (rondando os 90% de eficiência de captura), sendo que a eficiência aumenta até captura completa para partículas com diâmetros maiores do que $\approx 30\mu\text{m}$.

O facto crítico destes resultados, é que embora a captura do sistema se aproxime de um comportamento típico de um filtro cuja captura é praticamente independente do diâmetro das partículas, estes dois eléctrodos prejudicam substancialmente a captura das partículas acima de $\approx 4\mu\text{m}$, uma vez que esta, para o caso do eléctrodo simples era completa, e que para estes dois tipos de eléctrodos foi de apenas $\approx 95\%$.

Tentando perceber se estes resultados eram reprodutíveis a outras condições operatórias, apresentam-se na Figura 6.19 as curvas de eficiência fraccional para o caso com perdas totais de pressão de 1.60 kPa.

Analisando a Figura 6.19, é possível concluir que o eléctrodo *Pipe and Spike* apresenta uma curva de eficiência fraccional mais uniforme, tendo obtido a maior eficiência global.

Para concluir a análise da performance destes eléctrodos, apresentam-se na Tabela 6.5 as eficiências globais para cada um dos casos apresentados nas Figuras 6.18 e 6.19, sendo que apenas para o caso do eléctrodo simples é possível apresentar a correspondente linha de base e previsão do PACyc, cujas curvas de eficiência fraccional foram apresentadas na Secção 5.5.6.

Analisando a Tabela 6.5, conclui-se que com o sistema a operar a 0.93kPa com qualquer um dos eléctrodos estudados se obteve uma eficiência global de $\approx 97\%$. Para o caso a 1.60kPa, o sistema obteve eficiências globais entre $\approx 95\%$ e $\approx 98\%$, o que por um lado, pode ser consequência do tipo de eléctrodo usado ou por outro, das condições operatórias serem à partida menos favoráveis para a carga das partículas, e assim, mais dependente do tipo de eléctrodo.

Comparando as eficiências globais, conclui-se que o sistema que tem uma performance óptima, a qualquer uma das condições operatórias analisadas, é o eléctrodo *Pipe*

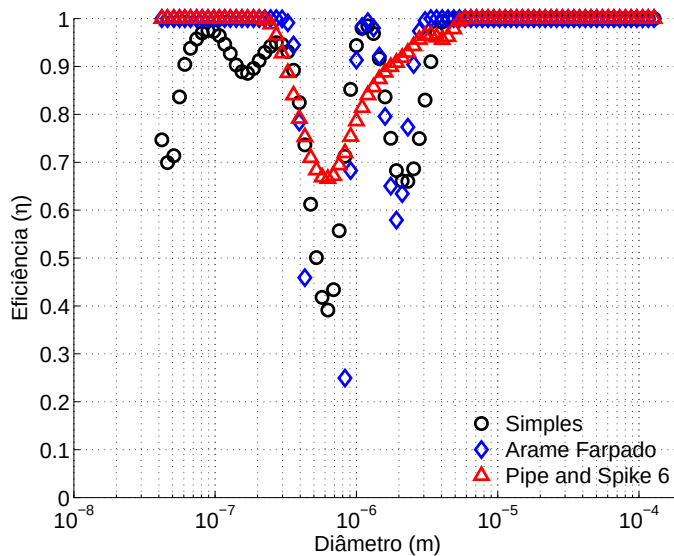


Figura 6.19 Curvas de Eficiência Fraccional a 1.60 kPa

Tabela 6.5 Eficiência global experimental e prevista por Mothes e Löffler (1988) e PACyc

Ensaio	Geometria	Linha Base (%)	PACyc (%)	Experimental (%)
0.93kPa	Simples	94.4	97.0	96.6
	Arame Farpado	-	-	97.2
	<i>Pipe and Spike 6</i>	-	-	97.5
1.60kPa	Simples	94.7	96.7	96.0
	Arame Farpado	-	-	94.5
	<i>Pipe and Spike 6</i>	-	-	97.6

and Spike, uma vez que apresenta sempre a maior eficiência global de separação.

Para complementar esta análise, compara-se ainda na Figura 6.20 a eficiência global em função da concentração à entrada para os casos com eléctrodo simples e *Pipe and Spike*, sendo evidente a melhor performance deste eléctrodo para ambos os casos.

No entanto existe alguma incerteza em extrapolar a performance para concentrações mais elevadas, uma vez que, como já foi referido atrás, quer pela análise da distribuição à saída e/ou pela análise da curva de eficiência fraccional, a performance deste eléctrodo não é muito reprodutível, principalmente na captura das partículas maiores, não sendo por isso possível afirmar categoricamente qual o eléctrodo óptimo para o sistema estudado.

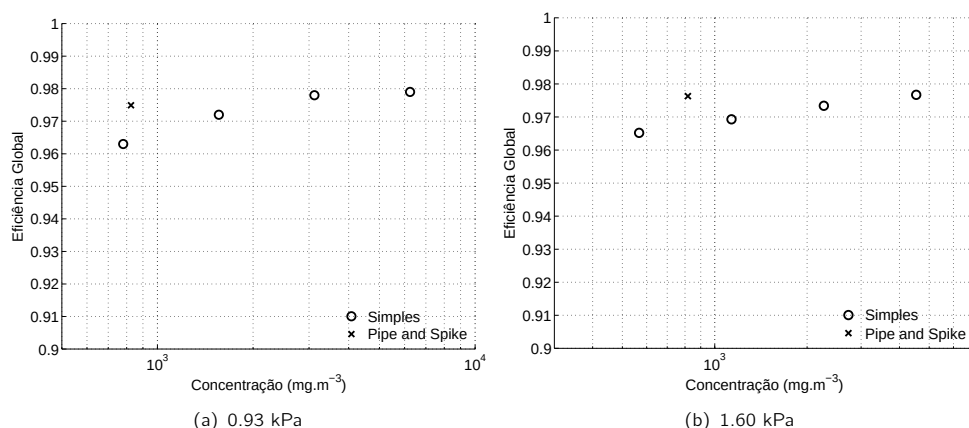


Figura 6.20 Eficiências globais para os casos experimentais estudados, em função da concentração e do tipo de eléctrodo

6.4.3 Conclusões

Com este estudo mais aprofundado acerca do impacto da geometria do eléctrodo na performance de separação do sistema, pretendia-se definir qual a geometria do eléctrodo que conduz a melhores resultados na separação de partículas.

Concluiu-se que o eléctrodo *Pipe and Spike* é o eléctrodo com o qual se obtém maiores eficiências globais, mas que, em alguns dos ensaios apresentados, a estas estão associadas baixas eficiências de captura das partículas maiores.

O teste com o eléctrodo de arame farpado permitiu perceber que este eléctrodo também tinha uma baixa performance na captura das partículas maiores, ficando como única alternativa viável na captura destas, o eléctrodo simples, que apresenta captura completa para partículas maiores do que $\approx 4\mu\text{m}$.

6.5 Síntese do capítulo

Neste capítulo apresentam-se os resultados preliminares do estudo da geometria do eléctrodo quando o sistema está a operar com recirculação electrostática.

Tendo este sido um dos objectivos inicialmente traçados como meta a cumprir neste doutoramento, começa-se por apresentar várias geometrias que foram consideradas como possíveis melhoramentos da performance de separação do sistema, tendo sido evidenciadas as principais características e posicionamento geométrico dentro do recirculador.

Estudaram-se as respectivas curvas características de voltagem/corrente, no sentido de definir quais as geometrias que pareciam ser mais promissoras no sentido de melhorar a captura do sistema standard, que no caso era com o eléctrodo simples.

Para concluir, fizeram-se duas análises, uma com incenso e outra comparativa a um dos casos apresentados no Capítulo 5, não tendo sido obtida uma geometria que cumprisse, de uma forma reprodutível e simultânea, elevadas capturas quer das partículas mais pequenas, quer das partículas maiores. No entanto, para efeitos práticos, parece que o eléctrodo *Pipe and Spike* dá consistentemente eficiências de captura global maiores, sendo assim, à luz destes dados, o preferido.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões do trabalho apresentado nesta tese de doutoramento, assim como se apresentam um conjunto de aspectos a serem explorados em trabalhos futuros acerca deste tópico.

7.1 Conclusões

Neste trabalho de doutoramento foi feita uma revisão sucinta dos modelos de previsão de ciclones, e baseado em trabalhos prévios, foi desenvolvido um modelo integrado de previsão da captura de ciclones. Este modelo, referido como PACyc, conduziu a uma previsão mais próxima dos valores de eficiência obtida experimentalmente nos ciclones numericamente otimizado, designados comercialmente por Hurricane[®].

O fundamento onde assenta este modelo, designado por PACyc, é o acoplar a aglomeração interparticular dentro do ciclone ao modelo de Mothes e Löffler (1988). Na opinião do autor, o modelo de Mothes e Löffler (1988) traduz de uma forma relativamente simples, mas com sentido físico, o que se passa dentro do ciclone em relação aos campos de velocidades e gradientes de concentração em cada uma das respectivas zonas em que o modelo divide o ciclone.

Além disso, o modelo desenvolvido acoplou ainda o estudo do fenómeno da aglomeração ao modelo de Salcedo et al. (2007), que por sua vez previa o comportamento do sistema de ciclone com recirculação mecânica e comercialmente referido como ReCyclone[®] MH. Com este acoplamento, o modelo PACyc consegue prever de uma forma mais precisa os valores de eficiência fraccional obtidos experimentalmente quando o sistema opera com recirculação.

Por fim, e no sentido de descrever na integra o sistema estudado neste trabalho,

o modelo PACyc levou ainda em linha de conta a presença de campo eléctrico no recirculador, acoplando princípios similares aos da precipitação electrostática para prever o comportamento do sistema ReCyclone[®] EH, tendo obtido resultados de simulação similares aos obtidos experimentalmente.

Tendo presente o modelo desenvolvido, e levando em linha de conta o apresentado no Capítulo 4, destacam-se em seguida as principais características a reter do modelo, sendo que algumas destas, são válidas mesmo para as linhas de base (pré-aglomeração):

- **Integração de modelos previamente desenvolvidos:** o modelo PACyc surge como um modelo que integra os modelos de previsão dos vários constituintes do sistema estudado neste trabalho, tendo a capacidade, de uma forma simples, de considerar a aglomeração quando combinada com qualquer um dos modelos de base. O modelo consegue prever razoavelmente não só qualitativamente mas também quantitativamente, os resultados obtidos experimentalmente;
- **Versatilidade da incorporação de informação:** o modelo PACyc consegue incorporar informação que anteriormente não era levada em linha de conta, de forma a melhor descrever o que acontece na realidade. Um exemplo desta situação é a capacidade de actualizar automaticamente a supressão de corrente que existe em função da concentração de partículas à entrada do recirculador, considerando que a presença de partículas se traduz num abaixamento do potencial efectivo dentro do recirculador e que este se traduz num abaixamento da intensidade de corrente gerada;
- **Sensibilidade real aos parâmetros físicos estudados:** tendo em conta que o modelo leva em consideração diversas abordagens diferentes, constata-se que o modelo reage de uma forma coerente aos parâmetros estudados neste trabalho. Com o estudo de sensibilidade paramétrica apresentado, é possível concluir que o modelo prevê elevadas eficiências para sistemas mais concentrados, para partículas mais densas, etc. Por outro lado, o modelo revelou-se insensível a parâmetros com maiores incertezas, como são as constantes a e b propostas por Löffler (1988), ou a pressão de contacto interparticular, entre outras. Por fim, para o caso particular da variável tempo, o modelo tem uma tendência assintótica, não prevendo valores de eficiência gradualmente maiores, conforme o tempo de aglomeração aumenta. Levando estes factos em linha de conta, é possível afirmar que o modelo PACyc leva a resultados coerentes e consistentes.

- **Aglomeração dentro do ciclone vs. aglomeração à entrada:** o modelo PACyc permitiu ainda testar a hipótese de a aglomeração à entrada ser relevante para os casos com recirculação, tendo no entanto sido possível concluir que esta, ainda que ocorresse, era desprezável. Considerando o esforço computacional extra que era necessário para prever esta aglomeração, justifica-se a alternativa de descartar a aglomeração à entrada como factor determinante para o aumento da eficiência de captura no sistema com recirculação.
- **Definição das condições empíricas (discretização do volume de controlo, amostragem da distribuição numérica e dispersão turbulenta):** tendo presente que o modelo PACyc é altamente dependente da qualidade de amostragem, da definição do volume de controlo e do modelo de dispersão usado, as previsões feitas neste trabalho foram feitas para que estas fossem conservativas. Ainda assim, analisando as previsões conservativas apresentadas, o modelo consegue ser uma clara melhoria em relação aos modelos usados para a obtenção da linha de base;
- **Eficiências fraccionais vs. eficiências globais:** embora um dos objectivos iniciais da integração do modelo de aglomeração interparticular no modelo PACyc fosse a obtenção das curvas de eficiência fraccional em forma de gancho, devido a restrições de CPU e memória (que têm impacto na qualidade da amostragem simultânea de partículas submicrométricas e de partículas-alvo com diâmetros elevados), estas curvas não foram obtidas. Por outro lado, o modelo PACyc, ainda que não consiga prever correctamente a captura experimental das partículas abaixo de $\approx 0.1\mu\text{m}$, consegue indicar um intervalo estreito para a eficiência global obtida para os casos apresentados neste trabalho. Assim sendo, o modelo PACyc apresenta-se como uma ferramenta que produz resultados de interesse a nível industrial, uma vez que, a esse nível, a variável relevante para, por exemplo, o controlo das emissões gasosas para a atmosfera, é a eficiência global obtida pelo sistema, e não a eficiência fraccional.

Tendo em conta que no Capítulo 5 se apresentam vários casos experimentais, sintetizam-se as principais conclusões a reter:

- **Descrição do sistema:** ainda que o sistema estudado à escala piloto seja relativamente complexo, mostrou-se possível descrever razoavelmente bem a maioria das variáveis do processo (caudais, velocidade e quedas de pressão) por relações simples;

- **Amostragem online vs. amostragem offline:** foram apresentadas as duas formas usadas para fazer amostragens no sistema, tendo ficado evidentes as limitações da amostragem *online*. No entanto, esta permite fazer uma análise comparativa em condições operatórias similares, o que faz com que esta seja particularmente útil durante a experiência para detectar se há alguma limitação na alimentação ou erro na amostragem. No entanto, para garantir a precisão quantitativa dos resultados, estes deverão ser validados pela amostragem *offline*, uma vez que, neste tipo de amostragem é possível controlar mais correctamente o caudal amostrado, para obter condições de amostragem isocinéticas, assim como contabilizar as partículas retidas na sonda;
- **Curvas de eficiência fraccional:** considerando que os ensaios quantitativamente representativos são obtidos através da amostragem *offline*, as curvas de eficiência fraccional são apresentadas em função das distribuições de tamanho de partículas medidas de forma *offline*, não querendo com isto afirmar, que estas são as curvas que traduzem o comportamento do sistema, mas apenas que são as que o traduzem mais correctamente. Nos casos em que não existia informação disponível das distribuições de tamanho de partículas obtidas a partir da amostragem *offline*, foram consideradas válidas as da amostragem *online*, com a correcção pelos valores obtidos nas isocinéticas;
- **Constituição do sistema:** analisando de uma forma integrada os resultados apresentados, observa-se consistentemente que as diversas optimizações do sistema¹, levam consistentemente a resultados de eficiência de captura melhores.
- **Síntese dos ensaios experimentais:** tendo presentes que as conclusões detalhadas de cada ensaio estão na respectiva secção, pretende-se evidenciar nos ensaios apresentados, que o sistema consegue ter uma eficiência elevada ($\approx 90\%$) para ciclone isolado e que mesmo a concentrações baixas, o sistema com recirculação mecânica e/ou electrostática revela eficiências muito elevadas. No entanto, para casos com concentrações mais elevadas, o ciclone isolado melhora a sua performance, enquanto que para os sistemas com recirculação electrostática, a performance do sistema começa a piorar para concentrações suficientemente elevadas para haver supressão total de corrente. Por fim, para o caso apresentado

¹Estas foram objecto de estudo em trabalhos prévios, tendo originado a geometria do ciclone Hurricane® (que foi obtida após optimização numérica), o sistema de recirculação mecânica (sistema ReCyclone® MH) e a adição de um eléctrodo gerador de campo eléctrico no recircular no sentido de maximizar a quantidade de partículas que recirculam para o ciclone, originando o sistema ReCyclone® EH.

na Secção 5.5.7, pode-se concluir que o sistema com maiores quedas de pressão tem uma performance pior.

Para concluir, sintetizam-se as principais conclusões a reter acerca dos ensaios preliminares de optimização da geometria do eléctrodo, apresentados no Capítulo 6.

- **Geometrias e variações estudadas:** apresentaram-se 4 tipos de eléctrodos diferentes. Os eléctrodos constituídos por um fio simples (que são directamente modelizados pelo modelo PACyc), os eléctrodos multi-filares, os eléctrodos tipo arame farpado e os eléctrodos de alta emissão tipo *Pipe and Spike*. Foram apresentadas variações dentro de cada um dos tipos de eléctrodos e construídas hipóteses que fundamentaram os resultados obtidos;
- **Curvas características:** foram construídas as curvas características de cada um dos eléctrodos estudados, tendo-se chegado à conclusão de que o eléctrodo que originava maior corrente para o potencial de referência (50 kV) era o tipo *Pipe and Spike* com 6 farpas.
- **Ensaio preliminares com fumos de incenso:** fica mais uma vez evidente neste caso o efeito benéfico do campo eléctrico na separação das partículas mais finas e embora neste exemplo o eléctrodo que levou ao melhor resultado de captura de partículas tenha sido o arame farpado mais fino, serve este caso apenas para evidenciar quais eléctrodos deviam ser descartados, uma vez que, mesmo tendo presente que a alimentação não foi reproduzível, os eléctrodos multifilares deram performance de separação pior do que o eléctrodo de referência;
- **Ensaio comparativo:** com este ensaio pretendia-se definir qual o eléctrodo óptimo entre os estudados. Definindo como o critério a maximizar a eficiência global, o eléctrodo que teve consistentemente maior eficiência foi o eléctrodo tipo *Pipe and Spike* 6. No entanto, este eléctrodo para o ensaio realizado a mais baixa queda de pressão, apenas apresentou captura completa para partículas de diâmetros superiores a 33µm, sendo este valor anormalmente elevado. Assim sendo, as conclusões retiradas terão que ser confirmadas com mais experiências.

7.2 Trabalhos futuros

Baseados no trabalho apresentado nesta tese, podem à partida traçarem-se os seguintes objectivos a serem cumpridos em trabalhos futuros:

- **Ensaaios exaustivos do modelo PACyc:** embora neste trabalho tenha sido feito um estudo de sensibilidade paramétrica, como o modelo PACyc é um modelo que aceita dados externos, será relevante, no sentido de assegurar as boas previsões do modelo, fazer previsões em várias condições que tenham sido testadas experimentalmente;
- **Descrição do sistema:** tendo presente que o sistema piloto é descrito por relações simples, este facto permitirá, estabelecer uma ligação directa entre o sistema à escala piloto e o modelo PACyc, de forma a que se consiga sistematizar a análise das condições operatórias óptimas para cada pó analisado à escala piloto;
- **Incorporação da acção de forças não consideradas no modelo de aglomeração:** uma vez que o modelo PACyc não consegue prever as curvas de eficiência fraccional em forma de gancho, é possível que existam outras forças responsáveis pela aglomeração destas partículas mais pequenas, além de uma amostragem insuficiente. Assim, apresenta-se a hipótese de que as forças eléctricas obtidas nas partículas finas por fricção poderão ser a causa deste aumento adicional de eficiência de captura das partículas muito finas;
- **Considerar a desaglomeração interparticular:** no modelo PACyc, as partículas colidem ou geram novos aglomerados que sofrem perturbação de trajectória e velocidade. No entanto, poderão existir condições que favoreçam o desaglomeração de aglomerados previamente formados, facto que não é levado em linha de conta no modelo actual;
- **Optimizar os valores relacionados com a turbulência:** como já foi referido, neste trabalho usaram-se os valores propostos por Sommerfeld e Ho (2003) para estimar grandezas que estão relacionadas com as escalas de turbulência no sistema. No entanto, estas deverão ser estudadas em maior detalhe, de forma a garantir que descrevem da melhor forma possível o escoamento turbulento que ocorre dentro do sistema estudado;
- **Desenvolvimento de uma interface que facilite o uso do modelo por terceiros:** tendo em conta o eventual potencial comercial das simulações efectuadas pelo modelo PACyc, será interessante desenvolver uma interface amigável para a utilização do modelo PACyc, assim como posterior integração dos resultados com uma folha de cálculo de forma a tornar mais expedita a utilização de resultados;

- **Incorporação da forma e porosidade dos aglomerados:** levando em consideração os trabalhos de Lipowsky e Sommerfeld (2008) e Stübing e Sommerfeld (2010), poder-se-ão considerar aglomerados que não tenham uma forma esférica, mudando as suas características de escoamento dentro do fluxo turbulento em função da sua forma. Com esta abordagem é possível considerar que as partículas aglomeradas sofrem um decréscimo de massa volúmica aparente devido aos espaços não preenchidos entre as partículas que formam o aglomerado, com consequências ao nível das eficiências fraccionais e global.
- **Estudo a nível teórico-prático da geometria do eléctrodo a usar no recirculador, de forma a garantir uma optimização mais segura:** considerando os resultados apresentados no Capítulo 6, será útil fazer um estudo teórico-prático do campo eléctrico gerado dentro do recirculador, em função da geometria de eléctrodo usada. Com esta abordagem, serão possíveis testar de uma forma mais fidedigna futuros eléctrodos que terão eventualmente melhores eficiências fraccionais e/ou globais.

Referências

- Abrahamson, J. (1975), 'Collision rates of small particles in vigorously turbulent fluid', *Chem. Eng. Science*, **30**, 1371–1379.
- Agency, E. E. (2004), 'European environment', 14, 40-49.
- Altmeyer, S., Mathieu, V., Jullemier, S., Contal, P., Midoux, N., Rode, S. e Leclerc, J. (2004), 'Comparison of different models on cyclones prediction performance for various operating conditions using general software', *Chemical Engineering and Processing*, **43**, 511–522.
- Avci, A. e Karagoz, I. (2000), 'A mathematical model for the determination of a cyclone performance', *International Communication Heat Mass Transference*, **27**, 263–272.
- Avci, A. e Karagoz, I. (2001), 'Theoretical investigation of pressure losses in cyclones separators', *International Communication Heat Mass Transference*, **28**, 107–117.
- Avci, A. e Karagoz, I. (2003), 'Effects of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators', *Journal of Aerosol Science*, **34**, 937–955.
- Baldwin, B. S. e Barth, T. J. (1990), 'A one-equation turbulence transport model for high reynolds number wall-bounded flows', NASA, TM102847.
- Barth, W. (1956), 'Brennstoff-warme-kraft', *Heft 1*, **9**, 1–9.
- Beccaria, G. B. (1772), *Electricismo artificiale*, Stamperia reale.
- BECKMAN (2009), 'Brochura do granulômetro laser', URL <https://www.beckmancoulter.com/eCatalog/CatalogItemDetails.do?productId=18452#hit0>.
- Berezowski, M. e Warmuzinski, K. (1993), 'Gas recycling as a means of controlling the operation of cyclones', *Chemical Engineering and Processing*, **32**, 345–347.
- Boussinesq, J. (1877), 'Theorie de l'écoulement tourbillant', *Mem. Pres. Acad. Sciences XXIII*, **46**, unk.

- Brown, P. N., Hindmarsh, A. C. e Petzold, L. R. (1994), 'Using krylov methods in the solution of large-scale differential-algebraic systems', *Journal Science Computers*, **15**, 1467–1488.
- Chen, S. T. e Stevens, B. (2000), 'Advanced turbulence models for simulating the flow and dispersion around', em *NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and Its Applications*.
- Clift, R., Ghadiri, M. e Hoffman, A. C. (1991), 'A critique of two models for cyclone performance', *AIChE Journal*, **37**, 285–289.
- Cochet, R. (1961), *Lois Charge des Fines Particules (Submicroniques) Etudes Théoriques - Controles Récents Spectre de Particules*, Centre National de la Recherche Scientifique, Paris.
- Cooperman, P. (1956), 'A new technique for the measurement of corona field strength and current density in electrical precipitation', *Trans. A. I. E. E.*, **unk**, 64.
- Cooperman, P. (1969), 'A new theory of precipitation efficiency', *APCA Meeting*, **4**, 69.
- Cottrell, F. (1911), 'The electrical precipitation of suspended particles', *Journal of Industrial & Engineering Chemical*, **3**, 542.
- COULTER (2009), URL http://www.beckmancoulter.com/coultercounter/homepage_tech_pids.jsp.
- Crawford, M. (1976), *Air Pollution Control Theory*, McGraw-Hill Inc.
- Cândido, M. d. G. L. C. (2000), *Ciclones de Recirculação para Captura de Poeiras Finas*, Tese de Doutorado, FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Davies, C. N. (1973), *Air Filtrations*, Academic Press.
- Deutsch, W. (1922), 'Unknown', *Ann. Phys. (Leipzig)*, **68**, 335–344.
- Dietz, P. (1981), 'Collection efficiency of cyclone separators', *AIChE Journal*, **27(6)**, 888–892.
- Dirgo, J. e Leith, D. (1985), 'Cyclone collection efficiency: Comparison of experimental results with theoretical predictions', *Aerosol Science and Technology*, **4**, 401.
- Elimelech, M., Gregory, J., Jia, X. e Williams, R. A. (1995), *Particle Deposition and Aggregation - Measurement, Modelling and Simulation*, Butterworth-Heinemann.
- Foust, A. S., Wenzel, L. A., Clump, C. W., Maus, L. e Andersen, L. B. (1960), *Principles of Unit Operations*, John Wiley, New York.
- Fraunhofer, J. (1973), 'Modelo de difracção de fraunhofer', URL http://en.wikipedia.org/wiki/Fraunhofer_diffraction.

- Fuchs, N. (1934), 'Über die stabilität und aufladung der aerosole', *Z. Physik*, **89**, 736–743.
- Gilbert, W. (1900), *De Magnete*.
- Gomes, J. (2005), 'Evaluation of compliance with national legislation on emissions in portugal', *J. AWMA*, **55**, 497–501.
- Gregory, J. (1969), 'The calculation of hamaker constants', *Advanced Colloid Interface Science*, **2**, 396–417.
- Gronald, G. e Staudinger, G. (2006), 'Investigations on agglomeration in gas cyclones', em *5th World Congress on Particle Technology*.
- Guitard, C. F. (1850), 'Condensation by electricity', *The Mechanics Magazine*, **53**, 346.
- Hiller, R. B. (1981), *Der Einfluß von Partikelstoß und Partikelhaftung auf die Abscheidung in Faserfiltern*, Tese de Doutorado, Universität Karlsruhe, VDI - Verlag GmbH Dusseldorf.
- Ho, C. A. e Sommerfeld, M. (2002), 'Modelling of micro-particle agglomeration in turbulent flows', *Chemical Engineering Science*, **57**(15), 3073–3084.
- Ho, C. H. e Sommerfeld, M. (2005), 'Numerical calculation of dust separation in a gas cyclone paying due attention to particle agglomeration', *Chemie Ingenieur Technik*, **77**(3), 282–290.
- Hoffman, A. C. e Stein, L. E. (2002), *Gas Cyclones and Swirl Tubes - Principles Design and Operation*, Springer.
- Hoffmann, A. C. e Berrino, A. (1999), 'On the shape of grade efficiency curves computed for centrifugal dedusters by cfd with lagrangian particle tracking', *Advanced Technologies for Fluid-Particle Systems*, **95**, 13–17.
- Hoffmann, A. C. e Stein, L. E. (2002), *Gas Cyclones and Swirl Tubes - Principles, Design and Operation*, Springer.
- Hoffmann, A. C., Vansanten, A., Allen, R. W. K. e Clift, R. (1992), 'Effects of geometry and solid loading on the performance of gas cyclones', *Powder Technology*, **70**, 83–91.
- Hohlfeld, M. (1824), 'Das niederschlagen des rauches durch elektricität', *Archiv. für die gesammter Naturlehre*, **2**, 205.
- Honig, E. P., Roerbensen, G. J. e Wiersema, P. H. (1971), 'Effect of hydrodynamic interaction on the coagulation ratio of hydrophobic colloids', *J. Colloid Interface Science*, **25**, 2031–2038.
- Hugi, E. e Reh, L. (2000), 'Focus on solids strand formation improves separation performance of highly loaded circulating fluidized bed recycle cyclones', *Chemical Engineering Processing*, **39**, 263–273.

- Hutchings, W. (1885), 'Electrical precipitation experiments in wales', *Berg-u-hüttenmännische Zeit.*, **44**, 253.
- Ioia, D. L. e Leith, D. (1989), 'Effect of cyclone dimensions on gas flow pattern and collection efficiency', *Aerosol Science and Technology*, **10**, 491.
- Kolmogorov, A. M. (1942), 'Equations of turbulent motion of an incompressible fluid', *Izvestia Academy of Sciences, Physics*, **6(1-2)**, 56–58.
- Koscielniak, L. e Sloan, M. (1999), *MicroCount-05 Liquid Sensor, Operations Manual*, Pacific Scientific Instrument, USA.
- Lapple, C. E. (1951), 'Process use many collection types', *Process use may collector types*, **Unk**, 144.
- Leith, D. e Licht, W. (1972), 'The collection of cyclone type. particle collectors - a new theoretical approach', *AIChE Symposium Series*, **126**, 196.
- Li, E. e Wang, Y. (1989), 'A new collection theory of cyclone separators', *AIChE Journal*, **35(4)**, 666–669.
- Linden e Ter, A. J. (1949), 'Investigations into cyclone dust collectors', *IMechE Journal*, **160**, 233–251.
- Lipowsky, J. e Sommerfeld, M. (2008), 'Influence of particle agglomeration and agglomerate porosity on the simulation of gas cyclones', em *6th International Conference on CFD in Oil & Gas, Metallurgical and Process Industries*, SINTEF/NTNU, Trondheim, Norway.
- Liu, B. Y. H. e Kapadia, A. (1978), 'Combined field and diffusion charging of aerosols in the continuous regime', *Journal of Aerosol Science*, **9**, 227–242.
- Liu, B. Y. H. e Yeh, H. C. (1968), 'On the theory of charging aerosol particles in an electrical field', *Journal of Applied Physics*, **39**, 1396–1402.
- Lodge, O. J. (1886), 'The electrical deposition of dust and smoke with special reference to the collection of metallic fumes and to a possible purification of the atmosphere', *Journal Soc. Chem Ind.*, **5**, 572.
- Lorenz, T. (1994), 'Heissgaseststaubung mit zyklonen', *VDI-Fortschrittsberichte, Dusseldorf*, **3**, 1–113.
- Löffler, F. (1988), 'Staubabscheidein', em *Stuttgart: Georg Thieme Verlag*.
- Mao, D., Edwards, J., Kuznetsov, A. e Srivastava, R. (2002), 'A model for fine particle agglomeration in circulating fluidized bed absorbers', *Heat Mass Transference*, **38**, 379.

- MapleSoft (2010), 'Maple 14 - the essential tool for mathematics and modelling', URL <http://www.maplesoft.com/Products/Maple/>.
- Marinos, C., Economopoulou, A. A. e Economopoulos, A. P. (2007), 'Comparative fractional efficiency predictions by selected cyclone simulation models', *Journal of Environment Engineering*, **133-5**, 566–567.
- Meier, H. F. e Mori, M. (1998), 'Gas-solid flow in cyclones: The eulerian-eulerian approach', *Computers Chemical Engineering*, **22 sup**, 641–644.
- Meissner, P. (1978), 'Calculation of flow field in a cyclone separator', *Chem Ing Tech*, **50-6**, 471.
- Mie, G. (1908), 'Beiträge zur optik trüber medien, speziell kolloidaler metallösungen (in german)', *Leipzig, Ann. Phys*, **330**, 377–445.
- Moeller, K. (1884), 'Röhrenformiges gas und dampffilter', German Patent 31911.
- Montavon, C. A. e et al. (2000), 'Mathematical modelling and experimental validation of flow in cyclone', em *BHR Conference on Cyclone Technologies*.
- Moser, R. D., Zandonade, P. e Vedula, P. (2005), 'A fresh approach to large-eddy simulation of turbulence', *Springer Berlin Heidelberg*, **101-V**, 195–202.
- Mothes, H. e Löffler, F. (1988), 'Prediction of particle removal in cyclones separators', *International Chemical Engineering*, **28**, 231.
- Murphy, A. T., Adler, F. T. e Penney, G. W. (1959), 'A theoretical analysis of the effects of an electrical field on the charging of fine particles', *Trans. A. I. E. E.*, **78**, 318–326.
- Muschelknautz, E. e Krambrock, W. (1970), 'Unknown', *Chem.-Ing.-Techn*, **42-5**, 247–255.
- Muschelknautz, E. e Trefz, M. (1990), 'Unknown', *Proceedings of Second World Congress on Particle Technology, Kyoto*, **Unk**, 52–71.
- Muschelknautz, E. e Trefz, M. (1991), 'Unknown', *VDI-Warmeatlas*, **6**, 1–9.
- Ogawa, A. (1999), 'Estimation of collection efficiency depended on feed particle concentration for axial flow cyclone dust collector', .
- Oglesby, S. (1978), *Electrostatical Precipitation - Pollution Engineering and Technology 8*, Marcel Dekker Inc.
- Paiva, J., Salcedo, R. e Araújo, P. (2010), 'Impact of particle agglomeration in cyclones', *Chemical Engineering Journal*, -, -, submitted.

- Parker, K. R. (1997), *Applied Electrostatic Precipitation*, Blackie Academic & Professional.
- Peek, F. W. (1929), *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*, McGraw-Hill Inc.
- Peinke, J., Kittel, A., Barth, S. e Oberlack, M. (2005), 'Progress in turbulence', em *Springer Proceedings in Physics*.
- Penney, G. W. e Matick, R. E. (1957), 'A probe method for measuring potentials in dc corona', em *A.I.E.E. Preprint*.
- Prandtl, L. (1932), 'Meteorologische anwendung der strömungslehre', *Beitr. Physik fr. Atoms*, **19**, 188–202.
- Roberts, J. W. P. e Webster, D. R. (2000), *Turbulent Diffusion*, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Salcedo, R. L. (1993), 'Collection efficiencies and particle-size distributions from sampling cyclones - comparison of recent theories with experimental-data', *Canadian Journal Of Chemical Engineering*, **71**, 20–27.
- Salcedo, R. L. (2000), 'High efficiency cyclones', European Patent 0972572, European Patent Bulletin.
- Salcedo, R. L. (2002), 'Recirculation cyclones for dedusting and dry gas cleaning', US Patent 2022178793, United States Patent Application Publication.
- Salcedo, R. L. (2008), 'Process of electrostatic recirculation for dedusting and gas cleaning and device thereof', WO/2008/147233.
- Salcedo, R. L. e Coelho, M. A. (1999), 'Turbulent dispersion coefficients in cyclone flow: An empirical approach', *Canadian Journal Of Chemical Engineering*, **77**(4), 609–617.
- Salcedo, R. L. e Pinho, M. J. (2003), 'Pilot- and industrial-scale experimental investigation of numerically optimized cyclones', *Industrial & Engineering Chemical Research*, **42**, 145–154.
- Salcedo, R. L. R., Chibante, V. G., Fonseca, A. M. e Candido, G. (2007), 'Fine particle capture in biomass boilers with recirculating gas cyclones: Theory and practice', *Powder Technology*, **172**(2), 89–98.
- Sato, T. (1987), 'Charging process of fine particles in unipolar flow', *Trans. I.E.E. Japan*, **107**, 155–161.
- Schuch, G. e Löffler, F. (1978), 'die abscheidewahrscheinlichkeit von feststoffpartikeln an tropfen in einer gasströmung durch trägheiseffekte', *Verfahrenstechnik*, **12**, 302–306.

- Smith, W. B. e McDonald, J. R. (1976), 'Development of theory for the charging of particles by unipolar ions', *Journal of Aerosol Science*, **7**, 151–166.
- Smoluchowsky, M. (1917), 'Versuch einer mathematischen theorie der koagulationskinetik kolloider lösungen', *Z. Phys. Chem.*, **92**, 129–168.
- Sommerfeld, M. (2001), 'Validation of a stochastic lagrangian modelling approach for inter-particle collisions in homogeneous isotropic turbulence', *International Journal Of Multiphase Flow*, **27**(10), 1829–1858.
- Sommerfeld, M. (2003), 'Analysis of collision effects for turbulent gas-particle flow in horizontal channel : Part i. particle transport', *International Journal of Multiphase Flow*, **29**, 675–699.
- Sommerfeld, M., G., K. e M., R. (1993), 'Some open questions and inconsistencies of lagrangian particle dispersion models', *Proceedings of the ninth symposium on turbulent shear flows*, **1**, 15–1.
- Sommerfeld, M. e Ho, C. A. (2003), 'Numerical calculation of particle transport in turbulent wall bounded flows', *Powder Technology*, **131**, 1–6.
- Spalart, P. R. e Allmaras (1992), 'One-equation turbulence model for aerodynamic flows', *AIAA*, **92**, 4–39.
- Stairmand, C. J. (1951), 'The design and performance of cyclone separators', *Trans. Ins. Chem. Eng.*, **29**, 356.
- Strauss, W. (1975), *Industrial gas cleaning - the principles and practice of the control of gaseous and particulate emissions*, Pergamon Press.
- Stübing, S. e Sommerfeld, M. (2010), 'Lagrangian modelling of agglomerate structures in a homogeneous isotropic turbulence', em *7th International Conference on Multiphase Flow*, Tampa, FL USA.
- Svarovsky, L. (1981), *Handbook of powder technology*, Elsevier Scientific Publishing Company New York.
- Swift, D. (2000), 'Coulter ls230 operating summary', URL <http://web.ges.gla.ac.uk/~dswift/ls230.pdf>.
- Taylor, G. I. (1954), 'The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe', *Proc. Royal Society*, **233**, 446.
- Tennekes, H. A. (1972), 'First course in turbulence', em *The MIT Press, Cambridge*.
- Thomas, J. B. e Wong, E. (1958), 'Experimental study of dc corona at high temperatures and pressures', *Journal of Applied Physics*, **29**, 1226.

- TOPAS (2009), 'Brochura do alimentador topas410h', URL http://www.topas-gmbh.de/_410_en.htm.
- Von Karman, T. e L., H. (1938), 'On the statistical theory of isotropic turbulence', *Proceedings of the royal society of London A164*, (**1**), 192–215.
- Wanker, R. (1998), 'Agglomeration in connection with separation experiments in a cyclone', em *Partec*.
- White, H. J. (1952), 'The role of corona discharge in the electrical precipitation process', *Electrical Engineering*, **71**, 67.
- White, H. J. (1963), *Industrial Electrostatical Precipitation*, International Society for Electrostatic Precipitation.
- Wikipedia (2010), 'Definition of turbulence', Wikipedia, URL <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Turbulence>.
- Williams, J. J. E. e Crane, R. I. (1983), 'Particle collision rate in turbulent flow', *International J. Multiphase Flow*, **9**, 421–425.
- Wysk, S. R., Smolensky, L. A. e Murison, A. (1993), 'Novel particulate control device for industrial gas cleaning', *Filtration & Separation*, **Jan/Fev**, 29–31.

Apêndices

Apêndice A

Informações adicionais PACyc

Neste apêndice apresentam-se informações que foram incorporadas no modelo PACyc no sentido de facilitar a integração do sistema de equações para cálculo das trajectórias das partículas em meio turbulento.

Tendo presente que este sistema é de elevada complexidade em termos de integração numérica, e que o solver utilizado (DDASPK desenvolvido por Brown et al. (1994)) tem a possibilidade de incorporar o jacobiano (implícito ou explícito) do sistema de equações, foi feita a expansão completa do sistema e as respectivas derivações, tendo utilizado o software Maple™ (MapleSoft, 2010).

A.1 Sistema equações expandido

Partindo do sistema de equações A.1 e A.2

$$\frac{dx_{p,i}^N}{dt} = u_{p,i}^N \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{du_{p,i}^N}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\rho c_D}{\rho_p D_p^N} (u_{F,i} - u_{p,i}^N) \left| \vec{u}_F - \vec{u}_p^N \right| + g_i \quad (\text{A.2})$$

e do coeficiente de arrasto dado pela equação A.3,

$$\frac{c_D}{C_{un}} = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1.0 + 0.15 Re_p^{0.687}) & Re_p < 1000 \\ 0.44 & Re_p \geq 1000 \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

com Reynolds da partícula (Re_p) dado pela equação A.4,

$$Re_p = \frac{\rho d_p |\vec{v}_{rel}|}{\mu} \quad (A.4)$$

e o factor de Cunningham (Cun) dado pela correlação A.5.

$$Cun = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} \left[1.257 + 0.40 \exp \left(\frac{-0.55d_p}{\lambda} \right) \right] \quad (A.5)$$

onde λ é percurso livre molecular médio.

Considerando as equações A.1 a A.5, obtém-se as seguintes equações, explícitas em ordem à posição e à velocidade da partícula e do fluído, em cada uma das direcções dos eixos coordenados bidimensionais e ortogonais.

$$\frac{dx_p}{dt} = v_{x,p} \quad (A.6)$$

$$\frac{dy_p}{dt} = v_{y,p} \quad (A.7)$$

$$\frac{dv_{x,p}}{dt} = A \times B \times C \times D \quad (A.8)$$

$$\frac{dv_{y,p}}{dt} = A \times B \times C \times E \quad (A.9)$$

No sentido de simplificar as expressões, os termos A , B , C , D e E são dados pelas expressões apresentadas nas Secções A.1.1 e A.1.2 em função do número de *Reynolds*.

A.1.1 Velocidades das partículas - Caso com $Re \geq 1000$

Para o caso em que o coeficiente de arrasto é constante, o que equivale a dizer, que o número de Reynolds é superior a 1000, os termos simplificativos A a E introduzidos anteriormente são dados pelas equações A.10 a A.14.

$$A = \frac{3\rho}{4\rho_p d_p} \quad (A.10)$$

$$B = \frac{0.44}{Cun} \quad (\text{A.11})$$

$$C = \sqrt{(u_x - v_{x,p})^2 + (u_y - v_{y,p})^2} \quad (\text{A.12})$$

É de salientar que os termos D e E são função da direcção considerada, sendo que o termo D corresponde à direcção xx e o termos E corresponde à direcção yy .

$$D = (u_x - v_{x,p}) \quad (\text{A.13})$$

$$E = (u_y - v_{y,p}) \quad (\text{A.14})$$

A.1.2 Velocidades das partículas - Caso com $Re < 1000$

Para o caso em que o coeficiente de arrasto é variável em função da velocidade, o que equivale a dizer, que o número de Reynolds é inferior a 1000, os termos simplificativos A a E introduzidos anteriormente são dados pelas equações A.15 a A.19.

$$A = \frac{3\rho}{4\rho_p d_p} \quad (\text{A.15})$$

$$B = \frac{\frac{24}{\rho d_p \sqrt{(u_x - v_{x,p})^2 + (u_y - v_{y,p})^2}} \left(1.0 + 0.15 \left(\frac{\rho d_p \sqrt{(u_x - v_{x,p})^2 + (u_y - v_{y,p})^2}}{\mu} \right)^{0.687} \right)}{Cun} \quad (\text{A.16})$$

$$C = \sqrt{(u_x - v_{x,p})^2 + (u_y - v_{y,p})^2} \quad (\text{A.17})$$

É de salientar que também para estes casos os termos D e E são função da direcção considerada, sendo que o termo D corresponde à direcção xx e o termos E corresponde à direcção yy .

$$D = (u_x - v_{x,p}) \quad (\text{A.18})$$

$$E = (u_y - v_{y,p}) \quad (\text{A.19})$$

A.2 Derivadas parciais do sistema de equações

No sentido de construir a matriz jacobiano do sistema de equações de forma a tornar o método numérico usado na resolução das equações diferenciais para determinação da posição e velocidade de cada partícula mais robusto, apresentam-se as derivadas parciais explícitas de cada um dos termos anteriormente apresentados.

A.2.1 Parâmetro A

$$\frac{\partial A}{\partial x_p} = \frac{\partial A}{\partial y_p} = \frac{\partial A}{\partial v_{x,p}} = \frac{\partial A}{\partial v_{y,p}} = 0 \quad (\text{A.20})$$

A.2.2 Parâmetro B

$$\frac{\partial B}{\partial x_p} = 0 \quad (\text{A.21})$$

$$\frac{\partial B}{\partial y_p} = 0 \quad (\text{A.22})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial v_{x,p}} = & -12 \mu \times \\ & \left(1 + \frac{3}{20} \left(\frac{\rho d_p \sqrt{u_x^2 - 2 u_x v_{x,p} + v_{x,p}^2 + u_y^2 - 2 u_y v_{y,p} + v_{y,p}^2}}{\mu} \right)^{\frac{687}{1000}} \right) \times \\ & \frac{(-2 u_x + 2 v_{x,p})}{\rho d_p (u_x^2 - 2 u_x v_{x,p} + v_{x,p}^2 + u_y^2 - 2 u_y v_{y,p} + v_{y,p}^2)^{3/2} +} \\ & \frac{6183}{5000} \frac{(-2 u_x + 2 v_{x,p})}{(u_x^2 - 2 u_x v_{x,p} + v_{x,p}^2 + u_y^2 - 2 u_y v_{y,p} + v_{y,p}^2)} \times \\ & \left(\frac{\rho d_p \sqrt{u_x^2 - 2 u_x v_{x,p} + v_{x,p}^2 + u_y^2 - 2 u_y v_{y,p} + v_{y,p}^2}}{\mu} \right)^{-\frac{313}{1000}} \end{aligned} \quad (\text{A.23})$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial B}{\partial v_{y,p}} = & -12 \mu \times \\
& \left(1 + \frac{3}{20} \left(\frac{\rho d_p \sqrt{u_x^2 - 2 u_x v_{x,p} + v_{x,p}^2 + u_y^2 - 2 u_y v_{y,p} + v_{y,p}^2}}{\mu} \right)^{\frac{687}{1000}} \right) \times \\
& \frac{(-2 u_y + 2 v_{y,p})}{\rho d_p (u_x^2 - 2 u_x v_{x,p} + v_{x,p}^2 + u_y^2 - 2 u_y v_{y,p} + v_{y,p}^2)^{3/2} +} \\
& \frac{6183}{5000} \frac{(-2 u_y + 2 v_{y,p})}{(u_x^2 - 2 u_x v_{x,p} + v_{x,p}^2 + u_y^2 - 2 u_y v_{y,p} + v_{y,p}^2)} \times \\
& \left(\frac{\rho d_p \sqrt{u_x^2 - 2 u_x v_{x,p} + v_{x,p}^2 + u_y^2 - 2 u_y v_{y,p} + v_{y,p}^2}}{\mu} \right)^{-\frac{313}{1000}}
\end{aligned} \tag{A.24}$$

A.2.3 Parâmetro C

$$\frac{\partial C}{\partial x_p} = 0 \tag{A.25}$$

$$\frac{\partial C}{\partial y_p} = 0 \tag{A.26}$$

$$\frac{\partial C}{\partial v_{x,p}} = - \frac{v_{x,p}}{\sqrt{(u_x - v_{x,p})^2 + (u_y - v_{y,p})^2}} \tag{A.27}$$

$$\frac{\partial C}{\partial v_{y,p}} = - \frac{v_{y,p}}{\sqrt{(u_x - v_{x,p})^2 + (u_y - v_{y,p})^2}} \tag{A.28}$$

A.2.4 Parâmetro D

$$\frac{\partial D}{\partial x_p} = 0 \tag{A.29}$$

$$\frac{\partial D}{\partial y_p} = 0 \tag{A.30}$$

$$\frac{\partial D}{\partial v_{x,p}} = -1 \tag{A.31}$$

$$\frac{\partial D}{\partial v_{y,p}} = 0 \tag{A.32}$$

A.2.5 Parâmetro E

$$\frac{\partial E}{\partial x_p} = 0 \quad (\text{A.33})$$

$$\frac{\partial E}{\partial y_p} = 0 \quad (\text{A.34})$$

$$\frac{\partial E}{\partial v_{x,p}} = 0 \quad (\text{A.35})$$

$$\frac{\partial E}{\partial v_{y,p}} = -1 \quad (\text{A.36})$$

A.3 Jacobiano do sistema de equações

Usando as expressões anteriores, constrói-se o jacobiano do sistema, sendo apresentados os termos respectivos em ordem a cada um dos termos das equações diferenciais.

A.3.1 Termos em $\frac{dx_p}{dt}$

$$\frac{\partial \frac{dx_p}{dt}}{\partial x_p} = 0 \quad (\text{A.37})$$

$$\frac{\partial \frac{dx_p}{dt}}{\partial y_p} = 0 \quad (\text{A.38})$$

$$\frac{\partial \frac{dx_p}{dt}}{\partial v_{x,p}} = 1 \quad (\text{A.39})$$

$$\frac{\partial \frac{dx_p}{dt}}{\partial v_{y,p}} = 0 \quad (\text{A.40})$$

A.3.2 Termos em $\frac{dy_p}{dt}$

$$\frac{\partial \frac{dy_p}{dt}}{\partial x_p} = 0 \quad (\text{A.41})$$

$$\frac{\partial \frac{dy_p}{dt}}{\partial y_p} = 0 \quad (\text{A.42})$$

$$\frac{\partial \frac{dy_p}{dt}}{\partial v_{x,p}} = 0 \quad (\text{A.43})$$

$$\frac{\partial \frac{dy_p}{dt}}{\partial v_{y,p}} = 1 \quad (\text{A.44})$$

A.3.3 Termos em $\frac{dv_{x,p}}{dt}$

$$\frac{\partial \frac{dv_{x,p}}{dt}}{\partial x_p} = 0 \quad (\text{A.45})$$

$$\frac{\partial \frac{dv_{x,p}}{dt}}{\partial y_p} = 0 \quad (\text{A.46})$$

$$\frac{\partial \frac{dv_{x,p}}{dt}}{\partial v_{x,p}} = \left(\frac{\partial A}{\partial v_{x,p}} B + A \frac{\partial B}{\partial v_{x,p}} \right) C D + A B \left(\frac{\partial C}{\partial v_{x,p}} D + C \frac{\partial D}{\partial v_{x,p}} \right) \quad (\text{A.47})$$

$$\frac{\partial \frac{dv_{x,p}}{dt}}{\partial v_{y,p}} = \left(\frac{\partial A}{\partial v_{y,p}} B + A \frac{\partial B}{\partial v_{y,p}} \right) C E + A B \left(\frac{\partial C}{\partial v_{y,p}} E + C \frac{\partial E}{\partial v_{y,p}} \right) \quad (\text{A.48})$$

A.3.4 Termos em $\frac{dv_{y,p}}{dt}$

$$\frac{\partial \frac{dv_{y,p}}{dt}}{\partial x_p} = 0 \quad (\text{A.49})$$

$$\frac{\partial \frac{dv_{y,p}}{dt}}{\partial y_p} = 0 \quad (\text{A.50})$$

$$\frac{\partial \frac{dv_{x,p}}{dt}}{\partial v_{x,p}} = \left(\frac{\partial A}{\partial v_{x,p}} B + A \frac{\partial B}{\partial v_{x,p}} \right) CD + AB \left(\frac{\partial C}{\partial v_{x,p}} D + C \frac{\partial D}{\partial v_{x,p}} \right) \quad (\text{A.51})$$

$$\frac{\partial \frac{dv_{y,p}}{dt}}{\partial v_{y,p}} = \left(\frac{\partial A}{\partial v_{y,p}} B + A \frac{\partial B}{\partial v_{y,p}} \right) CE + AB \left(\frac{\partial C}{\partial v_{y,p}} E + C \frac{\partial E}{\partial v_{y,p}} \right) \quad (\text{A.52})$$

Nomenclatura

Caracteres romanos

A	Parâmetro simplificador
B	Parâmetro simplificador
C	Parâmetro simplificador
c_D	Coefficiente de Arrasto
Cun	Factor de Cunningham
D	Parâmetro simplificador
d_p	Diâmetro da partícula (m)
D_p^N	Diâmetro da partícula N (m)
g_i	Aceleração na direcção i (m/s^2)
Re_p	Número de Reynolds da partícula
t	Instante de tempo (s)
$u_{F,i}$	Norma da velocidade do fluido na direcção i (m/s)
$u_{p,i}^N$	Norma da velocidade da partícula N na direcção i (m/s)
$v_{x,p}$	Velocidade da partícula na direcção xx (m/s)
$v_{y,p}$	Velocidade da partícula na direcção yy (m/s)
x_p	Posição da partícula na direcção xx (m)
$x_{p,i}^N$	Posição da partícula N na direcção i (m)
y_p	Posição da partícula na direcção yy (m)

Caracteres gregos

λ	Percurso livre molecular médio (m)
μ	Viscosidade do Fluido (Pa s)
ρ	Massa volúmica do fluido (kg/m^3)
ρ_p	Massa volúmica das partículas (kg_p/m^3_p)

Caracteres vectoriais

$\vec{u}_F$	Velocidade da fluido (m/s)
$\vec{u}_p^N$	Velocidade da partícula N (m/s)
$\vec{v}_{rel}$	Velocidade relativa entre uma partícula e o fluido (m/s)

Apêndice B

Ficheiros de dados do modelo PACyc

Em seguida apresentam-se exemplos dos vários ficheiros de dados do modelo PACyc, descrevendo em maior detalhe os dados mais relevantes.

B.1 Distribuição cumulativa

Apresenta-se na Tabela B.1 uma distribuição mássica cumulativa para servir de exemplo do tipo de distribuição que é fornecida como dado para o modelo PACyc.

Esta foi a distribuição usada para os estudos de sensibilidade paramétrica apresentados no Capítulo 4, sendo de destacar que os números são dados com o formato de entrada no modelo PACyc.

O ficheiro correspondente tem duas colunas, onde a coluna da esquerda corresponde ao diâmetro máximo de cada classe (em metros) e a coluna da direita corresponde à massa cumulativa de cada uma das classes.

Na coluna correspondente ao diâmetro, deve-se utilizar o diâmetro de Stocks quando esta informação está disponível, uma vez que este leva em linha de conta a forma das partículas e correspondente comportamento dinâmico.

Tabela B.1 Ficheiro de dados com a distribuição mássica cumulativa

Nr. Linha	Diâmetro (m)	Fracção mássica (< Diâmetro)
1	0.0000000e-08	0.0000000e+00
2	2.3000000e-07	0.0060000e+00
3	3.0000000e-07	0.0084000e+00
4	4.0000000e-07	0.0117000e+00
5	5.0000000e-07	0.0186000e+00
6	6.5000000e-07	0.0530000e+00
7	8.0000000e-07	0.0701000e+00
8	1.0000000e-06	0.1135000e+00
9	1.5000000e-06	0.2815000e+00
10	2.0000000e-06	0.4870000e+00
11	3.0000000e-06	0.8110000e+00
12	4.0000000e-06	0.9580000e+00
13	5.0000000e-06	0.9947000e+00
14	1.0000000e-05	1.0000000e+00

B.2 Dados das partículas

Apresentam-se na Tabela B.2 os dados acerca das partículas à entrada no sistema e que são relevantes para o modelo PACyc.

O ficheiro correspondente é constituído por 3 colunas, onde a primeira corresponde à identificação de cada variável, a segunda ao valor da variável e a terceira à unidade correspondente.

Entende-se por *massa volúmica* (linha 1) a massa volúmica do pó a analisar. Como o modelo não leva em linha de conta a porosidade das partículas é neste parâmetro que se define se as partículas se comportam como partículas porosas ou não, considerando-se a massa volúmica real ou aparente, conforme o caso.

Em relação à *constante dieléctrica* (linha 2) e *área superficial* (linha 4), estes são parâmetros que são apenas levados em linha de conta nos casos com campo eléctrico. A constante dieléctrica traduz a facilidade de carga eléctrica (concentração das linhas de campo eléctrico) e por omissão toma o valor 2.2¹, enquanto que a área

¹A constante dieléctrica toma o valor unitário para um isolante perfeito e ∞ para um condutor perfeito

Tabela B.2 Ficheiro de dados acerca das partículas alimentadas ao sistema

Nr. Linha	Variável	Valor	Unidade
1	massa volúmica	1.0000e+03	$\text{kg}_{\text{solido}}/\text{m}^3_{\text{solido}}$
2	constante dieléctrica	2.2000e+00	-
3	concentração	1.0000e-03	$\text{kg}_{\text{solido}}/\text{m}^3_{\text{fluido}}$
4	área superficial	1.0000e+03	m^2/kg
5	eficiência colisão (<i>a</i>)	6.5000e-01	-
6	eficiência colisão (<i>b</i>)	3.7000e+00	-
7	coe. de restituição energética (colisão)	4.0000e-01	-
8	coe. de fricção (colisão)	4.0000e-01	-
9	distância de contacto (colisão)	4.0000e-10	m
10	pressão de contacto (colisão)	5.0000e+09	Pa

superficial considera que o pó é definido pelo diâmetro mediano à entrada, sendo posteriormente recalculada em função das partículas que entram no recirculador.

A concentração (linha 3) é definida sendo igual à da saída do processo que se encontra a montante do sistema modelizado.

Os restantes parâmetros (linhas 5 a 10) estão relacionados com as propriedades relevantes para a colisão interparticular. Os parâmetros *a* e *b* correspondem aos valores das constantes da equação 3.63 e estão relacionados com a eficiência de colisão interparticular, o coeficiente de restituição energética define a quantidade de energia com que as partículas ficam depois de colidirem e não aglomerarem, o coeficiente de fricção determina a dissipação de energia por fricção entre as partículas, a distância de contacto é a distância para a qual as forças de van de Walls se fazem sentir e a pressão de contacto determina a resistência física do material.

B.3 Dados do ciclone

O ficheiro de dados que apresenta a geometria do ciclone está apresentado na Tabela B.3.

Há a referir que os valores das dimensões do ciclone não estão disponíveis, uma vez que a geometria do ciclone se encontra patenteada e por motivos comerciais não pode ser revelada.

O ficheiro correspondente é constituído por 3 colunas, onde a primeira corresponde

Tabela B.3 Ficheiro de dados com a geometria do ciclone e cálculo da dispersão turbulenta

Nr. Linha	Variável	Valor	Unidade/Opções
1	altura da entrada	n.d.	m
2	largura da entrada	n.d.	m
3	dist saída ao topo	n.d.	m
4	diâmetro saída topo	n.d.	m
5	altura do cilindro	n.d.	m
6	diâmetro saída baixo	n.d.	m
7	altura	n.d.	m
8	diâmetro	0.4500e+00	m
9	diâmetro da entrada	n.d.	m
10	factor fricção ciclone	7.0000e-03	-
11	estim. coeficiente dispersão	3.0000e-02	m ² /s
12	modelo dispersão ciclone	6	{1, 2, 3, 4, 5, 6}

à identificação de cada variável, a segunda ao valor da variável e a terceira à unidade correspondente.

Este ficheiro apresenta as dimensões do ciclone (da linha 1 à linha 9) sendo de referir que a entrada de gás no ciclone é feita ou pela combinação da informação das linhas 1 e 2 (definindo a entrada como rectangular), ou pela linha 9 (definindo a entrada com circular).

O factor de fricção do ciclone define a fricção entre as paredes do ciclone e o ar e entre estas e as partículas.

A determinação da dispersão turbulenta no ciclone é definida pela combinação das linhas 11 e 12. A estimativa da dispersão no ciclone apresenta 5 modelos alternativos, sendo que existe um caso (que é quando esta variável toma o valor 1) que o valor de dispersão é igual ao especificado pela linha 11). Caso contrário, a dispersão turbulenta é calculada pelo modelo de Salcedo e Coelho (1999) (quando esta variável toma o valor 2), pelo modelo de Li e Wang (1989) (quando esta variável toma o valor 3), pelo modelo de Ogawa (1999) (quando esta variável toma o valor 4), pelo modelo de Lorenz (1994) (quando esta variável toma o valor 5) ou pelo valor mais elevado do intervalo de confiança devolvido pelo modelo de Salcedo e Coelho (1999) (quando esta variável toma o valor 6), ou seja, o pior caso possível.

B.4 Dados de operação

Apresentam-se na Tabela B.4 os dados de operação que são introduzidos no modelo PACyc.

Tabela B.4 Ficheiro de dados com as condições operatórias

Nr. Linha	Variável	Valor	Unidade
1	caudal	0.1522e+00	$\text{m}^3_{\text{fluido}}/\text{s}$
2	rácio cic/recir	1.0000e+00	-
3	massa volúmica fluido	1.2000e-00	$\text{kg}_{\text{fluido}}/\text{m}^3_{\text{fluido}}$
4	viscosidade fluido	1.8500e-05	Pa/s
5	massa molar fluido	2.8900e-02	$\text{kg}_{\text{fluido}}/\text{mol}$
6	pressão	1.0000e+03	mbar
7	temperatura	2.9800e+02	K
8	humidade	0.0200e+00	$V_{\text{H}_2\text{O}}/V_{\text{ar}}$

O caudal (linha 1) é o caudal que está "disponível" a montante do sistema, seja este composto pelo ciclone ou por ciclone com recirculação.

O rácio ciclone/recirculador (linha 2) corresponde ao número de ciclone por número de recirculadores. Assim sendo, para as simulações efectuadas para a instalação piloto, esta adopta o valor de 1, mas o programa permite que haja situações em que hajam vários recirculadores por 1 ciclone (toma um valor inferior a 1) ou que haja um recirculador para vários ciclones (toma um valor superior a 1), sendo o caudal sempre referido a um recirculador.

As características do fluido são traduzidas pela massa volúmica do fluido, pela viscosidade do fluido e pela massa molar do fluido (linhas 3 a 5). As duas primeiras adoptam valores de correlações encontradas na bibliografia enquanto a massa molar é calculada levando em linha de conta a composição do gás que dá entrada no sistema. As restantes características (linhas 6 a 8) especificam a pressão a que o sistema está a operar, a temperatura a que o fluido se encontra e a humidade (em fracção volumétrica) do gás à entrada.

B.5 Dados de simulação

Apresenta-se na Tabela B.5 os dados de simulação que são introduzidos no modelo PACyc.

Tabela B.5 Ficheiro de dados com os condições de simulação

Nr. Linha	Variável	Valor	Opções
1	projecto ciclone	0	{0, 1}
2	modelo interacção	1	{0, 1}
3	modelo interacção_R	0	{0, 1}
4	recirc mecânica	1	{0, 1}
5	recirc electrostática	1	{0, 1, 2}
6	modelo RE	1	{0, 1, 2}
7	modelo eficiência ciclone	5	{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}

O ficheiro correspondente é constituído por 3 colunas, onde a primeira corresponde à identificação de cada variável, a segunda ao valor da variável e a terceira corresponde aos casos de selecção possíveis para cada variável.

Este ficheiro define as condições da simulação a efectuar. Da linha 1 à linha 4, as variáveis são binárias, enquanto as linhas 5 e 6 têm 3 hipóteses de selecção. A linha 7 tem 9 casos possíveis.

A variável de *projecto do ciclone* (linha 1) existe para activar a possibilidade de projectar a dimensão do ciclone em função das perdas de pressão admitidas. No âmbito desta tese, esta variável adoptou sempre o valor zero, uma vez que os ciclones utilizados já estavam projectados.

A variável *modelo de interacção* (linha 2) activa o estudo da aglomeração dentro do ciclone, enquanto a variável *modelo de interacção R* (linha 3) activa o estudo de aglomeração à entrada do sistema com recirculação.

A variável *recirculação mecânica* (linha 4) activa a recirculação mecânica enquanto a variável *recirculação electrostática* (linha 5) permite activar a recirculação electrostática que, quando combinada com a aglomeração dentro do ciclone, pode ser *à posteriori* desta (adoptando o valor 1) ou *à priori* desta última (adoptando o valor 2), isto é, na união do caudal de recirculação com o caudal do processo.

À variável *modelo de recirculação electrostática* (linha 6) corresponde a definição da zona de captura de partículas para o modelo de recirculação electrostática: o cilindro central virtual com diâmetro igual à saída do ar para a chaminé (adoptando o valor 1) ou a parede do recirculador (adoptando o valor 2).

Em relação à variável *modelo de eficiência de ciclone* (linha 7) corresponde o cálculo de eficiência do ciclone sem aglomeração a cada um dos modelos. Os resultados

destas simulações não se enquadram no âmbito desta tese, correspondendo o modelo usado (Mothes e Löffler, 1988) ao valor 5.

B.6 Dados do recirculador

A estrutura do ficheiro de dados que apresenta a geometria do recirculador está apresentada na Tabela B.6.

À semelhança do ciclone, a geometria real do recirculador está patenteada, não estando disponíveis os valores de geometria deste sistema.

Tabela B.6 Ficheiro de dados com a geometria do recirculador e cálculo da dispersão turbulenta

Nr. Linha	Variável	Valor	Unidade/Opções
1	altura da entrada	n.d.	m
2	largura da entrada	n.d.	m
3	altura da saída	n.d.	m
4	largura da saída	n.d.	m
5	distância saída ao topo	n.d.	m
6	diâmetro saída ar	n.d.	m
7	altura cilindro	n.d.	m
8	altura total	n.d.	m
9	diâmetro	0.4500e+00	m
10	diâmetro entrada	n.d.	m
11	diâmetro saída	n.d.	m
12	factor fricção recirculador	7.0000e-03	-
13	estim coeficiente dispersão	3.0000e-02	m ² /s
14	fracção recirculação	0.3500e-00	-
13	modelo dispersão recirculador	6	{1, 2, 3, 4, 5, 6}

À semelhança dos dados correspondentes ao ciclone, este ficheiro é constituído por 3 colunas, onde a primeira corresponde à identificação de cada variável, a segunda ao valor da variável e a terceira à unidade correspondente.

Este ficheiro apresenta as dimensões do recirculador (da linha 1 à linha 11) sendo de referir que a entrada de gás no recirculador é feita ou pela combinação da informação das linhas 1 e 2 (definindo a entrada como rectangular), ou pela linha 10

(definindo a entrada com circular), o mesmo acontecendo para as linhas 3 e 4 em relação à linha 11 para o caso da saída e o factor de fricção do recirculador (linha 12) define a fricção entre o ar e as paredes do recirculador.

A determinação da dispersão turbulenta no recirculador é definida pela combinação das linhas 13 e 15. A estimativa da dispersão no recirculador é feita correspondendo aos 5 modelos usados para prever a dispersão turbulenta dentro do ciclone. O caso definido pelo utilizador é obtido quando esta variável toma o valor 1 e valor de dispersão é igual ao especificado pela linha 13 e a fracção de recirculação do gás que entra no recirculador e que recircula para o ciclone é definida pela linha 14.

B.7 Dados do campo eléctrico:

Apresenta-se na Tabela B.7 os dados do campo eléctrico que são introduzidos no modelo PACyc.

Tabela B.7 Ficheiro de dados com as condições do campo eléctrico

Nr. Linha	Variável	Valor	Unidade
1	diâmetro do eléctrodo	1.5000e-03	m
2	comprimento do eléctrodo	1.8000e-00	m
3	potencial aplicado	5.0000e+01	kV
4	mobilidade eléctrica	2.1000e-04	m ² /Vs
5	diâmetro equiv. recirculador	3.1700e-01	m
6	factor fricção eléctrica	0.6500e-00	-

O ficheiro correspondente é constituído por 3 colunas, onde a primeira corresponde à identificação de cada variável, a segunda ao valor da variável e a terceira à unidade correspondente.

A variável diâmetro do fio (linha 1) corresponde ao diâmetro do eléctrodo usado para gerar o campo eléctrico, enquanto a variável comprimento do fio (linha 2) corresponde ao seu comprimento visível para o eléctrodo colector.

A variável potencial aplicado (linha 3) define qual o potencial que o utilizador pretende aplicar para gerar o campo eléctrico.

A variável mobilidade eléctrica (linha 4) define o mobilidade dos iões, dependendo da composição química do gás e do tipo de polaridade da Corona (Oglesby, 1978).

A variável `diâmetro equivalente do recirculador` (linha 5) define o diâmetro de um recirculador virtual. Esta é uma variável que foi introduzida para testes preliminares do eléctrodo *Pipe and Spike*, uma vez que para o campo eléctrico, o recirculador comporta-se como se tivesse um diâmetro inferior ao real, uma vez que as pontas das farpas estão substancialmente mais próximas das paredes do recirculador.

A variável `factor de fricção eléctrica` (linha 6) define a fricção entre as partículas carregadas electricamente e o recirculador.

B.8 Dados interacção:

Apresenta-se na Tabela B.8 o conjunto de dados a fornecer ao modelo PACyc que reúne as variáveis com impacto nas interacções interparticulares.

Tabela B.8 Ficheiro de dados com informação acerca do modelo de aglomeração interparticular

Nr. Linha	Variável	Valor	Unidade/Opções
1	diâmetro de truncatura	1.0000e-04	m
2	tempo final hipotético	8.0000e-04	s
3	passo integração	1.0000e-03	s
4	difusão turbulenta (k)	4.0000e-01	m^2/s^2
5	dissipação turbulenta (ϵ)	2.7000e+00	m^2/s^3
6	algarismos significativos	1.0000e+12	-
7	delta diâmetro novo	1.0000e-06	mm
8	factor multiplicativo	1	vez(se)
9	número fatias hipotéticas	1	fatia(s)
10	número sub-fatias hipotéticas	1	sub-fatia(s)
11	número partículas hipotéticas	200000	partícula(s)
12	override tempo	0	{0, 1}
13	override fatias	1	{0, 1}
14	override sub-fatias	1	{0, 1}
15	override número partículas	1	{0, 1}
16	número corridas	1	corrida(s)

O ficheiro correspondente é constituído por 3 colunas, onde a primeira corresponde à identificação de cada variável, a segunda ao valor da variável e a terceira à unidade

correspondente.

As variáveis `diâmetro de corte` (linha 1), `número de partículas hipotético` (linha 11) e `override número de partículas` definem em conjunto o tipo de discretização a fazer da distribuição numérica: se se usa o diâmetro de corte especificado na linha 1 (para tal, a linha 15 adopta o valor 0) ou se por outro lado se gera uma distribuição numérica com o número de partículas definido pela linha 11 (para tal, a linha 15 adopta o valor 1).

A variável `tempo final hipotético` (linha 2) e `override tempo` (linha 12) definem o tempo de interacção máximo das partículas: se a linha 12 adoptar o valor 0, o tempo máximo de contacto é definido pelas condições geométricas e operatórias do sistema; se a linha 12 adoptar o valor 1, o tempo máximo de contacto é definido pela linha 2.

A variável `passo de integração` (linha 3) define não só o passo de integração das equações diferenciais que traduzem as trajectórias de cada partícula em meio turbulento, mas também de quanto em quanto tempo as colisões interparticulares são analisadas.

As variáveis `difusão turbulenta (k)` (linha 4) e `dissipação turbulenta ( $\epsilon$ )` (linha 5) traduzem os valores constantes usados pelo modelo de turbulência usado no trabalho de Sommerfeld e Ho (2003), tendo sido adoptado neste trabalho os valores dos testes realizados por estes autores.

As variáveis `algarismos significativos` (linha 6) e `delta diâmetro novo` (linha 7) definem em conjunto a variação de diâmetro para que se considere que um novo aglomerado seja igual a um diâmetro previamente existente. O impacto da combinação destas variáveis é explicado em detalhe no Apêndice C.

A variável `factor multiplicativo` (linha 8) define por que valor é multiplicada a distribuição numérica a injectar gerada por qualquer um dos dois métodos de geração de distribuição representativa referidos.

As variáveis `número de fatias hipotético` (linha 9) e `override fatias` (linha 13) definem o número de fatias em que é dividido o volume de controlo: no caso da linha 13 ter o valor 0, o número de fatias é igual ao inteiro que mais se aproxima do quociente entre a altura do ciclone e a altura da entrada; no caso da linha 13 ter o valor 1, o número de fatias é igual ao valor definido na linha 9.

As variáveis `número de sub-fatias hipotético` (linha 10) e `override sub-fatias` (linha 14) definem o número de sub-fatias em que é dividida cada fatia do volume de controlo: no caso da linha 14 ter o valor 0, o número de sub-fatias é igual a 1; no caso da linha 13 ter o valor 1, o número de fatias é igual ao valor definido na linha 10.

A variável `número de corridas` (linha 16) define quantas corridas são feitas par-

tindo de sementes para geração de números aleatórios diferentes, mas nas mesmas condições, no sentido de validar estatisticamente os resultados.

Apêndice C

Definições de variáveis relevantes para o modelo PACyc

Considerando que alguns dos princípios subjacentes ao modelo de aglomeração, são particulares e bastantes específicos, são apresentadas em maior detalhe, algumas das considerações relevantes no desenvolvimento do modelo de Sommerfeld e Ho (2003).

Apresenta-se então a contextualização da constante de Hamaker, assim como a combinação das variáveis `algarismos significativos` e `delta diâmetro novo` para definição de um novo diâmetro criado.

C.1 Constante de Hamaker

A constante de Hamaker está presente na equação 3.71, e permite relacionar o potencial de interacção de superfície de diversos materiais.

Tendo em conta que no modelo de interacção usado neste trabalho apenas se levam em linha de conta o efeito das forças de Van der Waals, considera-se que é de interesse fazer uma breve contextualização das abordagens teóricas subjacentes a este fenómeno.

Em primeiro lugar temos a abordagem clássica (ou microscópica), onde se considera que os fenómenos de superfície são resultado da soma das interacções inter-moleculares. Todas as expressões obtidas considerando esta abordagem, dão origem a expressões que são função da geometria e de uma constante, conhecida por constante de Hamaker.

Considerando uma abordagem alternativa, temos a perspectiva macroscópica do fenómeno de atracção pelas forças de Van der Waals, que considera que este é resultado das características electromagnéticas do meio onde as partículas estão inseridas.

Esta nova abordagem, tem como grandes defeitos a dificuldade de obtenção de

dados experimentais e a dificuldade da formulação matemática para geometrias mais complexas.

Assim sendo, considerando de facto que o campo electromagnético tem influência nas interacções através de forças de Van der Walls, os sistemas reais são considerados usando expressões tipo Hamaker, levando em linha de conta efeitos de retardação devido ao fenómenos que ocorrem à macro-escala.

Considerando o fenómeno modelizado neste trabalho, é possível estabelecer que para o caso de partículas esféricas do mesmo material, com tamanhos diferentes, suspensas em ar, uma expressão simplificada e que traduz o potencial de interacção de Van der Walls entre as partículas (V_{ij}) é apresentada pela equação C.1, onde r_1 e r_2 são os raios das partículas e h é a distância entre elas.

$$V_{ij} = -\frac{A r_1 r_2}{6 h (r_1 + r_2)} \quad (C.1)$$

Fica evidente que o potencial é directamente proporcional ao tamanho das partículas ($\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \rightarrow \max\{r_1, r_2\}$) e é inversamente proporcional à distância entre elas (h).

Analisando os limites da expressão, quando $h \rightarrow \infty$, a atracção é nula, o que está de acordo com o senso comum.

No caso de $h \rightarrow 0$, a atracção tende para ∞ , o que não é razoável, sendo esta das principais razões para introduzir o conceito de retardação, uma vez que com esta, é possível tornar o potencial de atracção finito.

Em termos de métodos de cálculo da constante de Hamaker, Gregory (1969) sugere que uma estimativa aproximada do valor da constante de Hamaker pode ser feita considerando apenas propriedades ópticas dos materiais - o índice de refração limite (n_0) e a frequência característica de dispersão óptica (ω_v). Levando esta simplificação em linha de conta, a equação C.2 apresenta uma expressão simplificada de cálculo da constante de Hamaker entre dois meios diferentes.

$$A_{12} = \frac{27}{32} \frac{\hbar \omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \frac{(\epsilon_1 - 1)(\epsilon_2 - 1)}{(\epsilon_1 + 2)(\epsilon_2 + 2)} \quad (C.2)$$

onde $\hbar$ é a constante de Planck dividida por 2π . Considerando que no caso de estudo se consideram as interacções de partículas do mesmo material (apenas um meio), a equação C.2 simplifica-se dando origem à equação C.3.

$$A_{11} = \frac{27}{64} \hbar \omega_1 \left(\frac{\epsilon_1 - 1}{\epsilon_1 + 2} \right)^2 \quad (C.3)$$

Considerando válida a expressão apresentada anteriormente, existe ainda assim uma grande dificuldade na obtenção de dados úteis na bibliografia. Assim sendo, como aproximação para o trabalho de Sommerfeld e Ho (2003), considerou-se que a constante de Hamaker toma um valor representativo de uma gama de materiais que estão normalmente suspensos em ar, adoptando o valor de $5 \times 10^{-19} \text{J}$, que está dentro da gama $3 - 100 \times 10^{-19} \text{J}$, proposta por Elimelech et al. (1995).

C.2 Definição da criação de diâmetros novos

As variáveis *algarismos significativos* e *delta diâmetro novo* são parte integrante do ficheiro de dados apresentado na Secção B.8. Serve esta secção para explicar sucintamente o impacto destas variáveis.

Em estudos iniciais, de forma a tornar o processo de simulação mais expedito, foi feita a simplificação que nem todos os aglomerados formados criavam novos diâmetros. Assim sendo, a combinação destas duas variáveis define qual a diferença entre um diâmetro existente e um que fosse criado, para gerar um diâmetro novo.

De uma forma muito sucinta, o número de algarismos significativos (a_{sig}) determina a precisão usada na definição de um diâmetro novo. Por outro lado, a variação mediana no diâmetro novo (Δd_{new}) define qual a variação permitida a cada diâmetro, para se considerarem duas partículas iguais.

Considerando um caso de exemplo, se duas partículas de diâmetro $0.265 \mu\text{m}$ aglomerarem, o diâmetro do aglomerado resultante seria $0.333 \mu\text{m}$. Considerando que a classe inicial acima tem um diâmetro médio de $0.350 \mu\text{m}$ (referido na equação como d_{old}), o modelo PACyc processa esta informação conforme se evidencia na equação C.4.

$$d_{new,int} = \frac{\text{int}(d_{old} \times a_{sig}) \times (1.00 \pm \Delta d_{new})}{a_{sig}} \quad (\text{C.4})$$

Assim sendo, considerando $a_{sig} = 10^6$ e $\Delta d_{new} = 10^{-1}$, o intervalo de valores de diâmetros que se consideram pertencer à classe acima é dado pela equação C.5.

$$d_{new} = \frac{\text{int}(0.350 \times 10^6) \times (1.00 \pm 10^{-1})}{10^{12}} = [0.315, 0.385] \mu\text{m} \quad (\text{C.5})$$

Com os valores apresentados, o aglomerado novo pertenceria à classe acima da inicial, não sendo criada uma nova classe para inserir o aglomerado formado.

No entanto, ao longo do trabalho, constatou-se que esta simplificação introduzia um erro desnecessário nos resultados, tendo-se optado por utilizar por omissão os valores

de $a_{sig} = 10^{12}$ e $\Delta d_{new} = 10^{-6}$. Com estes parâmetros, o exemplo acima apresentado, traduzir-se-ia na formação de uma nova classe para o aglomerado formado, uma vez que o intervalo de diâmetros pertencentes à classe acima da das partículas que aglomeram é muito estreito, conforme se pode observar pelos resultados apresentados na equação C.6.

$$\begin{aligned} d_{new} &= \frac{\text{int}(0.350 \times 10^{12}) \times (1.00 \pm 10^{-6})}{10^6} \\ &= [0.349994, 0.350006] \mu\text{m} \end{aligned} \tag{C.6}$$

Nomenclatura

Caracteres romanos

a_{sig}	Número de algarismo significativos
A_{12}	Constante de Hamaker entre os meios 1 e 2 (J)
A_{11}	Constante de Hamaker entre no meio 1(J)
d_{new}	Intervalo dos diâmetro pertencentes a uma dada classe (m)
d_{old}	Diâmetro central da classe (m)
h	Distância entre as partículas (m)
$\hbar$	Constante de Planck dividida por 2π ($m^2 \text{ kg/s}$)
r_1	Raio da partícula 1 (m)
r_2	Raio da partícula 2 (m)
V_{ij}	Potencial de interação de van de Walls entre as partículas (V)

Caracteres gregos

Δd_{new}	Variação do diâmetro mínimo/máximo em relação ao valor central
ϵ_1	Permitividade eléctrica do meio 1 (F/m)
ϵ_2	Permitividade eléctrica do meio 2 (F/m)
ω_1	Frequência característica de dispersão óptica meio 1 (Hz)
ω_2	Frequência característica de dispersão óptica meio 2 (Hz)

Apêndice D

Efeito da Aglomeração à Entrada

No sentido de evidenciar as razões enunciadas para a não consideração da aglomeração na confluência da recirculação com a corrente do processo (referida como aglomeração à entrada), apresenta-se um caso de estudo para mostrar o tipo de resultado obtido.

A previsão da aglomeração à entrada tem um processamento de resultados substancialmente diferente da aglomeração dentro do ciclone, uma vez que esta tem o objectivo de observar a alteração da distribuição mássica que dá entrada no ciclone devido ao fluxo cruzado das partículas. Esta interacção é feita entre as partículas que são reinjectadas do recirculador e as partículas “frescas” que entram no sistema, provenientes do processo.

À semelhança da Secção 4.3.2, apresenta-se o pré-processamento das distribuições mássica e numérica à entrada, assim como as condições iniciais de injeção das partículas e o pós-processamento correspondente.

D.1 Pré-Processamento

Este processamento começa por considerar a eficiência de captura quando o sistema com recirculação mecânica opera em estado estacionário tendo presente que nesta situação o resultado é o obtido quando o sistema com recirculação opera sem aglomeração. Neste caso obtém-se a curva de eficiência fraccional do sistema ($\eta_{RM,i}$), correspondente à série a vermelho na Figura 4.29. Esta curva é resultante da equação 2.50 e obtém-se através da combinação da curva de eficiência fraccional do ciclone a funcionar em loop (circuito fechado) ($\eta_{C,loop}$) e da curva de eficiência fraccional do recirculador (η_R). Levando esta informação em linha de conta, assim como a distribuição mássica (sem aglomeração) que dá entrada no sistema ($f_{w,i}$), a fracção mássica de partículas que são

reinjectadas é dada pela equação D.1.

$$f_{w,i}^R = f_{w,i} (1 - \eta_{c,loop}) \eta_R, i = 1 \dots N_{classes} \quad (D.1)$$

Com este valor e sabendo o número de partículas a injectar inicialmente no volume de controlo definidas pela equação 4.6 ($n_{injectar,i}$), usando um dos métodos de amostragem da distribuição numérica (diâmetro de truncatura ou número de partículas representativas), é calculado o número de partículas que são recirculadas ($n_{recirculadas,i}$), usando para isso a equação D.2.

$$n_{recirculadas,i} = f_{w,i}^R \times n_{injectar,i}, i = 1 \dots N_{classes} \quad (D.2)$$

No sentido de traduzir as condições reais que se passam dentro do ciclone é ainda calculada a massa de partículas que é recirculada ($m_{recirculada}$), considerando que esta é função da massa total de partículas que está no ciclone (m_{total}). Para tal é usada a equação D.3.

$$m_{recirculada} = m_{total} \times \sum_{i=1}^{N_{classes}} f_{w,i}^R \quad (D.3)$$

Considerando a massa recirculada e a concentração inicial (C), através da equação D.4 é actualizada a concentração de partículas à entrada ($C_{entrada}$). Para definir o volume de colisão ($V_{colisao,R}$) são levados em linha de conta as dimensões reais do volume onde os fluxos vindos do recirculador e da entrada fresca se encontram e este é dado pela equação D.5.

$$C_{entrada} = \left(1 + \frac{m_{recirculada}}{V_{colisao,R}}\right) C \quad (D.4)$$

$$V_{colisao,R} = \min[a, a_{out}] \times \min[b, b_{out}] \quad (D.5)$$

Com a concentração à entrada, à imagem do pré-processamento para a aglomeração dentro do ciclone, o volume de controlo deve ser ajustado, de forma a se manter a proporção de volume de partículas por volume de gás. Isso é conseguido através do calculo dessa proporção (α_R) inicial (conforme a equação D.6), calculando em seguida o volume de partículas injectadas.

$$\alpha_R = \frac{V_{fluido}}{V_{particulas}} = \frac{C_{entrada}}{\rho_p} \quad (D.6)$$

Fazendo o quociente entre volume de partículas injectadas e α_R , obtém-se o correcto volume de controlo ($V_{controlo,R}$) conforme a expressão D.7.

$$V_{controlo,R} = \frac{V_{part,inj}}{\alpha_R} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{classes}} \frac{\pi}{6} (n_{injectadas,i} + n_{recirculadas,i}) d_{p,i}^3}{\alpha_R} \quad (D.7)$$

D.2 Condições iniciais

Tendo ajustado as dimensões do volume de controlo e definido o número de partículas a injectar, este caso tem a particularidade de definição precisa das velocidades de cada partícula, uma vez que se considera que as condições de turbulência à entrada são substancialmente diferentes das que ocorrem dentro do ciclone. Assim sendo, neste volume de controlo, o fluido tem uma velocidade igual ao quociente entre a combinação do caudal à jusante e que recircula pela área da tubagem que dá entrada no ciclone. Além disso, o fluido tem apenas velocidade no eixo dos xx , considerando válidos os eixos apresentados na Figura D.1.

Assim sendo, em função da zona de proveniência de cada partícula, esta é injectada com uma determinada velocidade. A Figura D.1 apresenta um esquema da zona de confluência, justificando as condições de injeção de cada um dos tipos de partículas.

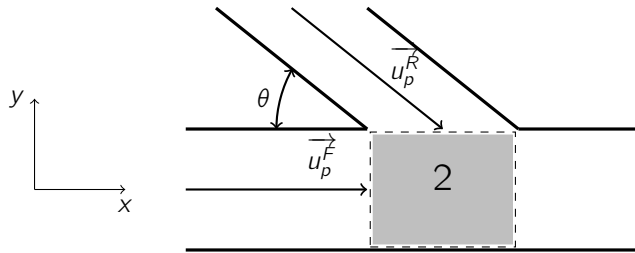


Figura D.1 Diagrama da zona de confluência à entrada do ciclone com recirculação mecânica

A velocidade de entrada das partículas “frescas” ($\vec{u}_p^F$) no volume de controlo 2 é calculada pela equação D.8, onde Q_{in} é o caudal de entrada no sistema, a é a altura da entrada do ciclone e b é a largura de entrada do ciclone.

$$\vec{u}_p^f = \frac{Q_{in}}{a b} \hat{u}_x \quad (D.8)$$

Por outro lado, a velocidade de entrada das partículas recirculadas no volume de controlo 2 ($\vec{u}_p^R$) é calculada pela equação D.9, onde Q_{recir} é o caudal que recircula no sistema, a_{out} é a altura da saída tangencial do recirculador e b_{out} é a largura da saída tangencial do recirculador:

$$\vec{u}_p^R = \frac{Q_{recir}}{a_{out} b_{out}} \cos \theta \hat{u}_x - \frac{Q_{recir}}{a_{out} b_{out}} \sin \theta \hat{u}_y \quad (D.9)$$

Tendo presente que as velocidades de injeção no volume de controlo são determinísticas, é possível estabelecer duas conclusões relevantes para a análise das colisões das partículas à entrada do ciclone:

- As partículas vindas da mesma zona, isto é, sejam estas “frescas” ou recirculadas, têm inicialmente probabilidade de colisão entre si igual a zero, uma vez que a sua velocidade relativa é zero;
- As colisões neste volume de controlo são tão mais relevantes, quanto maior é o ângulo θ ¹;

Analisando em maior detalhe esta última conclusão, é possível concluir que numa situação limite onde $\theta \rightarrow 0$ (isto é, o mais próximo possível de ser paralelo à entrada no ciclone), o módulo da velocidade relativa entre as partículas tende para o valor mínimo, o que implica que a probabilidade de colisão também tende para o seu valor mínimo. Nesta situação a aglomeração à entrada é praticamente nula devido à baixa velocidade relativa entre as partículas.

Considerando o outro caso limite, se $\theta \rightarrow 90^\circ$, estamos na presença do caso que conduz à maior velocidade relativa entre as partículas sem que haja curto-circuito de partículas para a tubagem que vem do recirculador, correspondendo este caso a um módulo de velocidade relativa igual a $\frac{Q_{in}}{a b} - \frac{Q_{recir}}{a_{out} b_{out}}$. Este valor encontra-se no domínio das velocidades relativas das partículas dentro do ciclone. Nesta situação, a aglomeração à entrada é muito relevante, uma vez que todas as partículas que sejam provenientes de zonas diferentes, terão grande probabilidade de colidirem e de aglomerarem. No entanto,

¹Para $\theta > 90^\circ$, é expectável que haja curto-circuito de partículas da entrada para o recirculador e este facto, embora favoreça o aumento da velocidade relativa entre as partículas, prejudica a captura do sistema, não sendo por isso de interesse o seu estudo aprofundado.

uma situação destas não é realista, uma vez que levaria a uma perda de pressão muito substancial na zona de confluência das correntes gasosas e que de facto não traduz a realidade estudada neste trabalho. No entanto, como hipótese académica deixa-se a ressalva que nesta situação particular, é possível que a aglomeração à entrada tenha maior relevância do que a prevista para o sistema estudado.

Considerando o caso estudado neste trabalho, o ângulo θ é igual a 30° , o que justifica o pouco impacto da aglomeração à entrada na alteração da distribuição de partículas processada pelo ciclone, conforme será possível ver adiante.

D.3 Pós-Processamento

Depois de ter analisado as interações interparticulares, é necessário traduzir a formação dos novos aglomerados na correspondente alteração da distribuição mássica à entrada do ciclone.

Ao contrário das aglomerações dentro do ciclone, para prever a aglomeração à entrada do ciclone não é necessário fazer o acompanhamento de cada partícula inicial até à partícula final que esta faz parte, uma vez que nesta zona, o processo de análise de aglomerações passa por analisar a alteração de tamanhos de partículas devido aos choques das partículas que se deslocam obliquamente.

A discretização feita das partículas que recirculam é feita à semelhança da que é feita para o estudo da aglomeração dentro do ciclone, calculando o número real de partículas que recircula ($n_{real,i}^R$), usando a equação D.10, partindo da distribuição mássica que dá entrada no recirculador ($f_{w,i}^R$), do diâmetro médio de cada classe ($d_{p,i}$) e da massa volúmica das partículas (ρ_p).

$$n_{real,i} = \frac{f_{w,i}^R m_{total}}{\frac{\pi d_{p,i}^3 \rho_p}{6}}, i = 1 \dots N_{classes} \quad (D.10)$$

Com o número real de partículas, calcula-se o número original de partículas que recirculam em proporção ($n_{original}^R$) (equação D.11) e em função da estratégia de truncatura, o número de partículas de cada classe a injectar no volume de controlo ($n_{injectar,i}^R$) é determinado pela equação D.12.

$$n_{original,i}^R = \frac{n_{real,i}^R}{\min(n_{real,i}^R; i = 1 \dots n_{classes})}, i = 1 \dots n_{classes} \quad (D.11)$$

$$n_{injectadas,i}^R = \frac{n_{real,i}^R}{n_{real,dtrun}^R} \quad (D.12)$$

Com o número real, através da expressão D.13 pode-se calcular a distribuição numérica relativa que recircula ($f_{n,i}^R$).

$$f_{n,i}^R = \frac{n_{real,i}^R}{\sum_{i=1}^{n_{classes}} (n_{real,i}^R)} \quad (D.13)$$

Tendo isto presente, um dos passos iniciais neste pós-processamento é a atribuição das partículas geradas às classes inicialmente definidas. Esta aproximação é feita tendo em conta os limites superiores de cada classe definidos a partir da distribuição cumulativa. Tomando como exemplo a distribuição mássica apresentada na Tabela 4.1, pode-se construir a Tabela D.1 onde são evidenciados os diâmetros mínimos e máximos de cada classe.

Tabela D.1 Definição das classes finais das partículas iniciais

D (μm)	fw %	D_{inicial} (μm)	D_{final} (μm)
0.115	0.60	0.00	0.23
0.265	0.24	0.23	0.30
0.350	0.33	0.30	0.40
0.450	0.69	0.40	0.50
0.575	3.44	0.50	0.65
0.725	1.71	0.65	0.80
0.900	4.34	0.80	1.00
1.250	16.80	1.00	1.50
1.750	20.55	1.50	2.00
2.500	32.40	2.00	3.00
3.500	14.70	3.00	4.00
4.500	3.67	4.00	5.00
7.500	0.53	5.00	10.0

Analisando alguns casos particulares, pode-se afirmar que:

- **Caso 1:** se considerarmos que duas partículas de diâmetro $0.115\ \mu\text{m}$ colidem e aglomeram, e usando a equação 3.73, obtém-se que o diâmetro do novo aglomerado é $\approx 0.145\mu\text{m}$;
- **Caso 2:** se considerarmos que uma partícula de diâmetro $0.115\ \mu\text{m}$ e uma partícula de diâmetro $0.265\ \mu\text{m}$ colidem e aglomeram, usando a equação 3.73, obtém-se que o diâmetro do novo aglomerado é $\approx 0.272\mu\text{m}$;
- **Caso 3:** se considerarmos que uma partícula de diâmetro $0.115\ \mu\text{m}$ e uma partícula de diâmetro $0.350\ \mu\text{m}$ colidem e aglomeram, usando a equação 3.73, obtém-se que o diâmetro do novo aglomerado é $\approx 0.354\mu\text{m}$;

Com a discretização apresentada e levando em linha de conta a informação presente na Tabela D.1, pode-se enfatizar o caso 3 em particular, uma vez que cruzando a informação, o aglomerado formado tem um diâmetro que pertence à primeira classe. O resultado final desta aglomeração não se traduziria no aumento de massa da primeira classe, muito por causa da insuficiente discretização inicial das partículas.

No sentido de melhorar o estudo da alteração das partículas e tomando em consideração que segundo a definição de distribuição mássica, esta trata-se de uma quantificação aproximada das dimensões das partículas presentes num dado volume de controlo², tendo-se optado por complementar a informação directa das aglomerações de partículas considerando que se tratava de uma distribuição mássica não-cumulativa contínua.

Com este procedimento é possível identificar as variações de tamanho de partículas nas distribuições originais, mesmo de partículas de diâmetros que não tinham sido injectadas inicialmente. Assim o processo de transformação da distribuição não cumulativa (histograma) na sua correspondente contínua, passa por usar a *spline* que melhor ajusta a distribuição original.

Apresentam-se na Tabela D.2 os resultados da discretização na zona de confluência, assim como o tratamento dos resultados (em termos de número de partículas) da *spline*. Salienta-se que o número de partículas injectadas “frescas” é o apresentado na Tabela 4.1 enquanto o número de partículas recirculadas é calculado pela equação D.2. A variação do número de partículas refere-se ao balanço entre o início e o fim da interacção na zona da entrada, sendo este referido como número final.

Analizando em detalhe os valores apresentados, é de destacar que a variação apresentada é sempre negativa ou nula, não havendo (nos diâmetros apresentados) variações

²Esta aproximação considera que é possível traduzir em classes a quantidade (mássica ou numérica) de partículas pertencentes a um dado intervalo de tamanhos, o qual é referenciado pelo diâmetro central.

Tabela D.2 Exemplo do tratamento das distribuições mássicas com *splines*

D (μm)	n _{injectado}	n _{recirculado}	n _{spline}	Δ _{partículas}	n _{final}
0.115	1150	296	1446	-44	1402
0.147	-	-	1080	-32	1048
...	...	...	...	...	...
0.265	37	9	46	-1	45
...	...	...	...	...	...
0.350	22	5	27	0	27
0.354	-	-	29	0	29
...	...	...	...	...	...

positivas. Isto é possível justificar pela acção combinada de dois fenómenos: considerando que os diâmetros apresentados são muito pequenos, é expectável que com a aglomeração, estas partículas se aglomerem com partículas maiores, logo “desapareçam”, isto é, que tenham variação de número negativa; no entanto, esta variação de número das classe pequenas não se traduz num aumento do número de partículas das classe intermédias, uma vez que, por um lado as partículas das classes intermédias podem estar a dar origem a partículas pertencente às classes maiores; por outro lado, o aumento de tamanho da partícula-alvo (maior) pode ser residual, fazendo com que a variação da classe seja nula.

Tendo presente que o objectivo deste pós-processamento passa pela reconstrução da distribuição mássica à entrada dos ciclone, é calculada a massa inicial injectada de cada uma das classes, usando para isso a equação D.14. Para obter os valores reais da massa injectada por classe ($m_{injectada,i}$), o modelo leva em linha de conta o número real de partículas que entra “fresca” no ciclone ($n_{real}^{inicial}$), sendo este calculado pela equação 4.3.

$$m_{injectada,i} = \sum_{i=D_{inicial,i}}^{D_{final,i}} \rho_p \frac{\pi}{6} d_{p,i}^3 n_{real,i}^{inicial}, i = 1 \dots N_{classes} \quad (D.14)$$

De uma forma semelhante às partículas “frescas”, o modelo usando o número real de partículas final por classe (n_{real}^{final}), calcula a massa de partículas que recircula ($m_{final,i}$) através da equação D.15.

$$m_{final,i} = \sum_{i=D_{inicial,i}}^{D_{final,i}} \rho_p \frac{\pi}{6} d_{p,i}^3 n_{real,i}^{final}, i = 1 \dots N_{classes} \quad (D.15)$$

Em relação ao limites dos somatórios nas equações D.14 e D.15, estes referem-se ao limites inferior e superior de cada uma das classes, conforme o evidenciado na Tabela D.1.

Tendo enunciado os princípios usados para a reconstrução da distribuição mássica que dá entrada no ciclone, apresenta-se na Figura D.2 de uma forma esquemática as diferentes fases do pós-processamento, sendo de referir que as representações não estão à escala, uma vez que como será evidenciado adiante, as alterações são muito pouco significativas tendo sido necessário representar de uma forma não realista (exagerada) o impacto da aglomeração à entrada na distribuição mássica final.

Na Figura D.2(a) evidencia-se a transformação da distribuição mássica não cumulativa (a vermelho), sob a forma de histograma, na sua correspondente em forma de função contínua. Apresentam-se também as correspondentes distribuições numéricas não cumulativas (a azul) sob a forma de histograma e de função. É evidente no caso dos histogramas os inícios e os fins de cada classe, sendo essa informação perdida na respectiva representação em forma de função.

Com a função representativa da distribuição numérica, faz-se um ajuste a essa função através de uma *spline* cúbica. Usando esta distribuição, faz-se uma discretização do número de partículas que esta distribuição representa, sendo possível interpolar o número de partículas originalmente “existentes” para diâmetros intermédios. Este processo é evidenciado na Figura D.2(b).

Em função da variação das partículas em cada um dos diâmetros finais, actualiza-se a distribuição numérica, conforme se apresenta na Figura D.2(c), onde se evidencia a variação numérica de cada um dos diâmetros existentes ou criados, ajustando os valores da distribuição numérica final através de uma *spline* cúbica. Nesta Figura é possível evidenciar que o número de partículas das primeiras classes tende a diminuir, compensando com o aumento nesse número das classes maiores. O resultado desta operação matemática dá origem à distribuição numérica pós-aglomeração.

A fase final do pós-processamento é apresentada na Figura D.2(d) onde se apresenta o processo de conversão da *spline* cúbica que representa a distribuição numérica na correspondente distribuição mássica. É de referir que nesta fase do pós-processamento, as operações são feitas levando em consideração o número real de partículas de forma a calcular a massa real de partículas em cada uma das classes da distribuição mássica

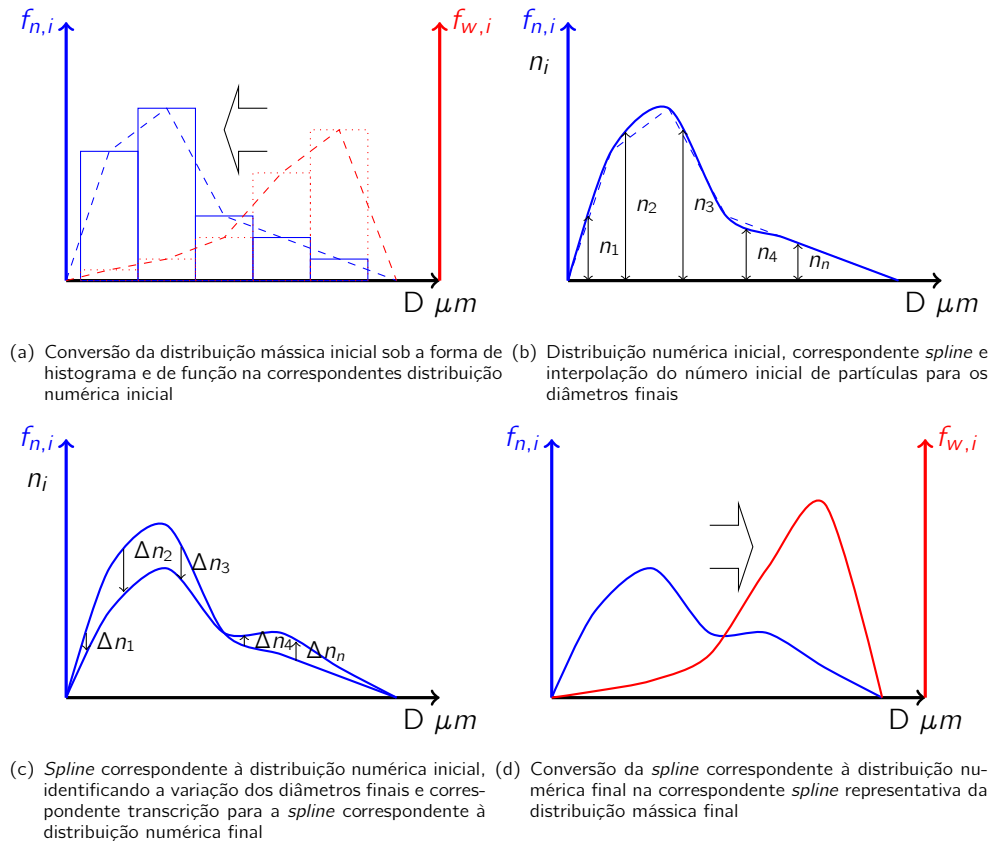


Figura D.2 Diferentes fases do pós-processamento da aglomeração à entrada

final. Preserva-se assim a massa total de partículas originalmente presentes.

Como nota adicional, considera-se ainda que não há a criação de classes novas, o que de facto está de acordo com o que acontece na realidade, uma vez que normalmente o limite superior da última classe é muitíssimo superior aos diâmetros maiores gerados neste processo de aglomeração à entrada.

D.4 Resultados parciais

A Figura D.3 evidencia a distribuição mássica não cumulativa à entrada do ciclone, com e sem levar em linha de conta a aglomeração à entrada do ciclone. É de referir que esta alteração, ao contrário da evidenciada na Figura 4.9, é apenas consequência do fluxo cruzado de partículas no volume de controlo 2. De forma a tornar mais evidente o

impacto da aglomeração à entrada, na Figura D.3(b) é evidenciada a variação de cada uma das classes.

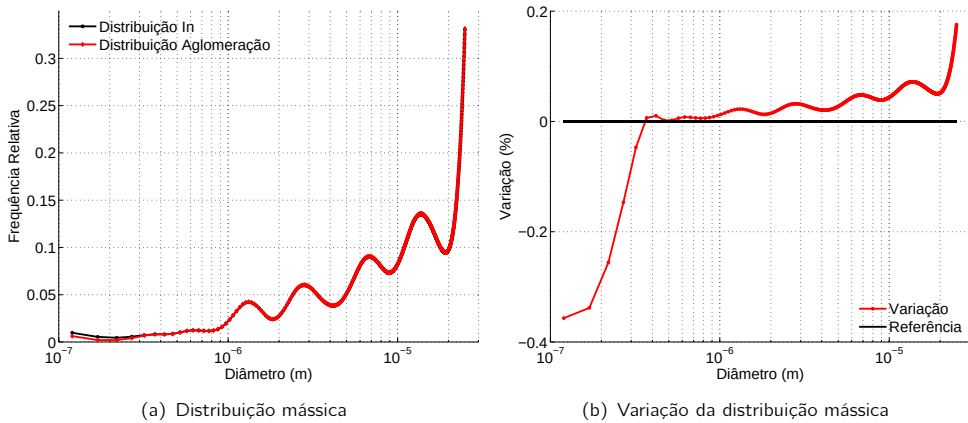


Figura D.3 Distribuições de tamanho de partículas pré e pós-aglomeração à entrada do ciclone

Constata-se que os resultados da distribuição mássica estão conforme o expectável, com o desaparecimento das partículas pequenas (variação negativa nas primeiras cinco classes) e com o aparecimento de partículas grandes (variação positiva a partir da sexta classe).

No entanto, fica também evidente que a alteração na distribuição mássica é muitíssimo ténue, e tendo presente que para simular as interacções na entrada do ciclone é necessário tempo de processamento extra, fica justificada a não utilização desta situação para simular as experiências com recirculação.

Nomenclatura

Caracteres romanos

a	Altura da entrada do ciclone (m)
a_{out}	Altura da saída do recirculador (m)
b	Largura da entrada do ciclone (m)
b_{out}	Largura da saída do recirculador (m)
C	Concentração mássica de partículas à entrada (kg/m^3)
$C_{entrada}$	Concentração à entrada considerando as partículas recirculadas
$D_{final,i}$	Diâmetro maior pertencente à classe i (m)
$D_{inicial,i}$	Diâmetro mais pequeno pertencente à classe i (m)
$d_{p,i}$	Diâmetro médio da classe i (m)
d_{trun}	Classe do diâmetro de truncatura
$f_{n,i}$	Fracção numérica das partículas com diâmetro i no início
$f_{n,i}^R$	Fracção numérica das partículas com diâmetro i que são reinjectadas
$f_{w,i}$	Fracção mássica das partículas com diâmetro i no início
$f_{w,i}^R$	Fracção mássica das partículas com diâmetro i que são reinjectadas
$m_{final,i}$	Massa final da classe i (kg)
$m_{injectada,i}$	Massa injectada da classe i (kg)
$m_{recirculada}$	Massa total recirculada (kg)
m_{total}	Massa total de partículas no ciclone (kg)
$N_{classes}$	Número de classes originais
$N_{diametros}^f$	Número de diâmetros finais (após colisão)
$n_{injectadas,i}^R$	Número de partículas recirculadas do diâmetro i que são reinjectadas
$n_{injectar,i}$	Número de partículas a injectar no volume de controlo do diâmetro i
$n_{original,i}$	Número em proporção de partículas do diâmetro i dentro do ciclone
$n_{original,i}^R$	Número em proporção das partículas do diâmetro i que são reinjectadas
$N_{particulas}^f$	Número de partículas finais
$n_{real,d_{trun}}$	Número de partículas da diâmetro de truncatura
$n_{real,final}$	Número final virtual de partículas dos diâmetros gerados que pertencem a uma dada classe
$n_{real,i}^R$	Número real de partículas do diâmetro i recirculadas que pertencem a uma dada classe
$n_{recirculadas,i}$	Número de partículas recirculadas
n_1	Número de partículas interpolado
n_2	Número de partículas interpolado
n_3	Número de partículas interpolado
n_4	Número de partículas interpolado
Q_{in}	Caudal total à entrada (m^3/s)
Q_{recir}	Caudal recirculador à entrada (m^3/s)

$V_{colisao,R}$	Volume de colisão das partículas recirculadas com as partículas frescas (m^3)
$V_{controle,R}$	Volume de controlo na entrada do ciclone (m^3_{fluido})
V_{fluido}	Volume real do fluido (m^3_{fluido})
$V_{part,inj}$	Volume total das partículas injectadas (m^3_{solido})

Caracteres gregos

α_R	Rácio entre o volume de partículas e o volume de gás na entrada do ciclone ($m^3_{solido}/m^3_{fluido}$)
Δn_1	Variação do número de partículas interpolado
Δn_2	Variação do número de partículas interpolado
Δn_3	Variação do número de partículas interpolado
Δn_4	Variação do número de partículas interpolado
η_i^{fatia}	Eficiência de uma partícula do diâmetro i em cada fatia
η_R	Eficiência do recirculador a funcionar em ciclo fechado
θ	Ângulo de entrada entre as partículas reinjectadas e as partículas frescas (rad)

Caracteres vectoriais

$\vec{u}_f$	Velocidade das partículas frescas à entrada do ciclone (m/s)
$\vec{u}_p^R$	Velocidade das partículas recirculadas à entrada do ciclone (m/s)