

# CICLONES DE RECIRCULAÇÃO: APLICAÇÃO À LAVAGEM

Ana Fonseca - *Faculdade de Ciência e Tecnologia, UFP*  
Centro de Modelação e Análise de Sistemas Ambientais (CEMAS)  
Professora Associada | E-mail: [afonseca@ufp.pt](mailto:afonseca@ufp.pt)

Romualdo Salcedo - *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*  
Professor Catedrático | E-mail: [rsalcedo@fe.up.pt](mailto:rsalcedo@fe.up.pt)

José Orfão - *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*  
Professor Associado | E-mail: [jjmo@fe.up.pt](mailto:jjmo@fe.up.pt)

Vânia Chibante - *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*  
Estudante de Doutoramento | E-mail: [vaniachi@fe.up.pt](mailto:vaniachi@fe.up.pt)

## ABSTRACT

The main purpose of this research project is to study at a laboratory-scale the application of recirculating cyclones to the dry scrubbing of acid gases using solid particles of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . A new system will be used, based on the combination of very high efficiency reverse-flow cyclones with a straight-through cyclone concentrator, which will simultaneously remove the injected solid particles and promote their partial recirculation. The possibility of dry-scrubbing of acid gases in recirculating cyclones seems very promising: if the expectations are confirmed, this is a low cost technology, highly efficient both for the dry-scrubbing of acid gases and for the removal of particulate pollutants.

## RESUMO

O projecto de investigação aqui apresentado tem como principal objectivo o estudo, à escala laboratorial, da aplicação de ciclones de recirculação à lavagem de gases ácidos com partículas sólidas de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . O equipamento utilizado é um sistema inovador, baseado na combinação de um ciclone de fluxo invertido de muito elevada eficiência com um ciclone concentrador de passo simples, que simultaneamente remove as partículas sólidas e promove a sua recirculação parcial. A possibilidade de efectuar a lavagem de gases ácidos neste tipo de equipamento parece deveras promissora: a confirmarem-se as expectativas, estamos perante uma tecnologia de baixo custo e altamente eficiente quer para a lavagem a seco de gases ácidos como para o despoiramento do gás.

## 1. INTRODUÇÃO

O projecto de investigação que aqui se apresenta está em curso no Laboratório de Tecnologias Sólido/Fluído na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) desde Outubro de 2002, tendo a duração total prevista de 3 anos. As instituições participantes são a FEUP e o Centro de Modelação e Análise de Sistemas Ambientais (CEMAS) da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Fernando Pessoa. Este projecto foi submetido a concurso para financiamento da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), e foi aprovado com a classificação de 'Excelente'.

## 124 2. ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS DO PROJECTO

Os gases ácidos, nomeadamente  $\text{SO}_2$  e  $\text{HCl}$ , são poluentes atmosféricos que podem ser encontrados nos efluentes gasosos de vários processos de combustão. Um dos efeitos negativos deste tipo de poluentes é a formação das chuvas ácidas resultantes da absorção e/ou reacção química destes compostos com a água naturalmente presente na atmosfera. Para além disso, o ar contaminado com gases ácidos, particularmente com  $\text{HCl}$  e  $\text{HF}$ , é agressivo para as mucosas dos olhos e aparelho respiratório, podendo ter efeitos agudos e crónicos na saúde humana (De Nevers, 1995).

A purificação de emissões contendo gases ácidos é feita através da reacção com sorbentes alcalinos em processos húmidos, semi-secos e secos. A remoção a seco consiste em injectar na corrente gasosa um reagente alcalino na forma de um pó seco. Os sorbentes alcalinos à base de cálcio (nomeadamente  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{CaO}$ ) são os mais frequentemente utilizados, devido ao seu baixo custo e elevada eficiência na remoção de gases ácidos (Heap, 1996). O produto sólido formado é então removido num equipamento de despoeiramento, usualmente filtros de mangas ou precipitadores electrostáticos. Seria de grande interesse prático e económico se esta lavagem a seco e o despoeiramento pudessem ter lugar no mesmo equipamento. Os ciclones parecem particularmente adequados para conjugar esta dupla função de reactor e separador gás-sólido para vários tipos de reacções (Lédé et al., 1986; Li, 1988; Lédé, 2000).

Os ciclones são despoeiradores centrífugos caracterizados por baixos custos de investimento e operação, e que são facilmente adaptáveis a condições operatórias extremas (elevada carga de partículas no gás, temperatura e pressão elevadas). A principal limitação deste tipo de equipamento são as eficiências de captura relativamente baixas, especialmente para partículas com diâmetro inferior a  $\cong 5 \mu\text{m}$ .

O ciclone de fluxo invertido com entrada tangencial é o mais utilizado para o despoeiramento de gases em ambiente industrial. O projecto e desenvolvimento de ciclones tem sido tradicionalmente baseado em ‘famílias’ de geometrias, caracterizadas por razões fixas entre 7 dimensões chave. Estudos recentes vieram demonstrar que é possível projectar ciclones de fluxo invertido com eficiências de despoeiramento significativamente superiores através de técnicas de optimização numérica (Salcedo e Cândido, 2001; Ravi et al., 2000). Com base nesta nova aproximação foram desenvolvidas e patenteadas duas novas geometrias de ciclones: RS\_VHE and RS\_K, tendo sido já comprovado quer laboratorialmente quer à escala piloto que as suas eficiências de remoção de partículas são muito superiores às dos ciclones de fluxo invertido tradicionais (Salcedo e Campos, 1999; Salcedo e Cândido, 2001). A utilização de um sistema combinado de um ciclone de muito elevada eficiência e de um ciclone concentrador de passo simples conduz ainda a melhorias na eficiência de despoeiramento, para além de permitir facilmente fazer a recirculação parcial do gás e do sólido (Cândido, 2000).

Estes ciclones de recirculação foram testados quer à escala laboratorial quer à escala piloto, atingindo eficiências de remoção de partículas comparáveis às obtidas com filtros de mangas.

A remoção de HCl com partículas sólidas de  $\text{Ca(OH)}_2$  em contínuo num ciclone de fluxo invertido foi já estudada previamente por esta equipa de investigação (Fonseca et al., 1998; Fonseca, 1999; Fonseca et al., 2001; Fonseca et al., 2003) tendo-se conseguido atingir remoção praticamente completa deste poluente gasoso com quantidades de reagente sólido correspondentes a cerca de 2 a 3 vezes a razão estequiométrica. Os resultados experimentais revelaram, no entanto, fraca utilização deste reagente já que as conversões por ele atingidas não ultrapassaram em média os 30%. Será então importante estudar a possibilidade de reutilizar uma parte deste reagente parcialmente convertido, diminuindo a quantidade de reagente fresco necessária (e consequentemente os custos operatórios do processo) sem comprometer as elevadas eficiências de remoção do HCl. A recirculação parcial do gás à saída do ciclone poderá também conduzir a aumentos da eficiência de purificação de gases ácidos para as menores quantidades de reagente sólido (Lédé, 2000).

Pretende-se com este projecto, numa primeira fase, estudar laboratorialmente a viabilidade deste sistema de recirculação ser utilizado para a remoção de HCl por lavagem a seco com  $\text{Ca(OH)}_2$ . Irá ser feita uma caracterização o mais completa possível do comportamento deste sistema no que diz respeito às eficiências de remoção obtidas (através de monitorização em contínuo do gás à entrada e saída do sistema) em função de variáveis operatórias como a quantidade de reagente sólido injectada e a taxa de recirculação do gás e do sólido. A gama de condições operatórias seleccionada para este estudo são as temperaturas baixas ( $T < 373\text{K}$ ) e elevado teor de humidade do gás a purificar ( $[\text{H}_2\text{O}] \cong 3.4\%$  em volume) uma vez que se revelaram adequadas em ciclones simples (Fonseca et al., 1998; Fonseca, 1999; Fonseca et al., 2001; Fonseca et al., 2003). Outro passo importante será o estudo da possibilidade de extensão deste sistema à lavagem de outros poluentes ácidos, como o  $\text{SO}_2$ . Pretende-se também, numa segunda fase do estudo, modelizar teoricamente os resultados experimentais obtidos.

### 3. METODOLOGIA

Numa primeira fase estão a ser conduzidos testes laboratoriais com uma corrente gasosa contaminada com HCl (e posteriormente com  $\text{SO}_2$ ), a baixas temperaturas e elevados teores de humidade. Esta corrente é purificada através da adição de partículas sólidas de  $\text{Ca(OH)}_2$  num sistema de ciclones de recirculação. As taxas de recirculação são monitorizadas quer para a fase gasosa quer para a fase sólida. As eficiências de remoção do HCl são calculadas através da monitorização em contínuo da concentração do gás nas correntes de entrada e saída do ciclone. A eficiência de remoção das partículas sólidas é quantificada através de medições gravimétricas e monitorização em linha

**126** da granulometria das partículas nas correntes de entrada e saída do sistema. No final desta fase do estudo deverá ter sido estabelecido o desempenho desta tecnologia em função de algumas variáveis, como a concentração do gás à entrada, temperatura, quantidade de sólidos alimentada e fracção de sólidos reciclados.

O equipamento experimental utilizado é basicamente um conjunto de ciclones de recirculação onde é promovido o contacto contínuo entre as partículas sólidas de  $\text{Ca(OH)}_2$  e e uma corrente gasosa de  $\text{N}_2$  contaminada com HCl ou  $\text{SO}_2$ . Os ciclones de recirculação são colocados no interior de um forno de cromatografia gasosa com elevada precisão no controlo da temperatura. A concentração dos gases ácidos é regulada através de válvulas de agulha, e é controlada através de um micro-rotâmetro em politetrafluoretileno (PTFE). A corrente gasosa de  $\text{N}_2$  é humidificada através do borbulhamento numa coluna com água destilada, e a sua temperatura e teor de humidade são medidos em linha através de um higrómetro. As partículas sólidas de  $\text{Ca(OH)}_2$  são alimentadas em contínuo ao sistema de ciclones através de um alimentador de poeiras, utilizando-se  $\text{N}_2$  como gás de arraste. A concentração do HCl no gás à saída do sistema é determinada fazendo borbulhar uma fracção controlada da corrente de saída num absorvedor de gases com câmara lateral, e o pH da solução resultante é monitorizado em contínuo. Para a determinação da concentração da corrente de saída quando se utilizar o  $\text{SO}_2$  utilizar-se-á um detector deste gás em linha.

Numa segunda fase deste estudo será feita a modelação teórica dos resultados experimentais obtidos com o objectivo de aprofundar o conhecimento relativamente aos fenómenos envolvidos, e possibilitar a extrapolação destes resultados para a escala industrial.

#### **4. RESULTADOS ESPERADOS**

A tecnologia em estudo neste projecto tem potencialmente um elevado impacte positivo no meio ambiente, uma vez que poderá contribuir para a resolução de um problema difícil de poluição atmosférica. A confirmarem-se as expectativas aqui patentes, estamos perante uma tecnologia de baixo custo e altamente eficiente no que diz respeito quer à lavagem a seco de gases ácidos quer ao despoeiramento do gás. Os resultados esperados poderão ser facilmente transferidos para a prática industrial, com especial aplicação nas pequenas e médias indústrias que neste momento dificilmente conseguem comportar economicamente as tecnologias de tratamento tradicionais para este tipo de poluentes gasosos.

- Cândido, M.G. (2000). *Remoção de poeiras finas com Ciclones de Recirculação*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- De Nevers, N. (1995). *Air Pollution Control Engineering*. McGraw Hill International Editions, New York.
- Fonseca, A.M., Órfão, J.M. e Salcedo, R.L. (1998). Kinetic modeling of the reaction of HCl with solid lime at low temperatures. *In: Ind. Eng. Chem. Res.*, 37, pp.4570.
- Fonseca, A.M. (1999) *Purificação de Emissões Gasosas Contendo Ácido Clorídrico por Remoção a Seco num Reactor Ciclone*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Fonseca, A.M., Órfão, J.M. e Salcedo, R.L. (2001). Dry-scrubbing of gaseous HCl with solid lime in a cyclone reactor at low temperatures. *In: Ind. Eng. Chem. Res.*, 40, pp. 304.
- Fonseca, A.M., Órfão, J.M. e Salcedo, R.L. (2003). A new approach to the kinetic modeling of the reaction of gaseous HCl with solid lime at low temperatures. *In: Chem. Eng. Sci.*, 58, pag. 3499.
- Heap, B.M. (1996). The Continuing Evolution and Development of the Dry Scrubbing Process for the Treatment of Incinerator Flue Gases. *In: Filtr. Sep.* 33, p.2.
- Lédé, J.; Verzaro, F.; Antoine, B.; Villermaux, J. (1986). Flash Pyrolysis of Wood in a Cyclone Reactor. *In: Chem. Eng. Process.*, 20, p.309.
- Lédé, J. (2000). The Cyclone: A Multifunctional Reactor for the Fast Pyrolysis of Biomass. *In: Ind. Eng. Chem. Res.*, 39, p.893.
- Li, H.Z. (1988) *Le Cyclone Reacteur*. Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy.
- Ravi, G., Gupta, S.K. e Ray, M.B. (2000). Multiobjective Optimization of Cyclone Separators Using Genetic Algorithm. *In: Ind. Eng. Chem. Res.*, 39, p. 4272.
- Salcedo, R.L. e Campos, J.A.G. (1999). Optimization for Pollution Reduction: a Numerical Approach to Cyclone Design. *In: Proceedings of the 2nd Conference on Process Integration, Modeling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction*, Veazprém, Hungary.
- Salcedo, R.L. e Cândido, M.G. (2001). Global Optimization of Reverse-Flow Gas-Cyclones: Application to Small-Scale Cyclone Design. *In: Sep. Sci. Tech.*, 36, p. 2707.