República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 0809865-4 B1

(22) Data do Depósito: 30/04/2008

(45) Data de Concessão: 15/09/2020

(54) Título: SISTEMA DE CICLONES PARA DESPOEIRAMENTO E LAVAGEM DE GASES, RESPECTIVO PROCESSO E UTILIZAÇÃO

(51) Int.Cl.: B04C 7/00; B04C 9/00; B03C 3/15; F01N 3/01.

(30) Prioridade Unionista: 30/04/2007 PT 103727.

(73) Titular(es): ROMUALDO LUÍS RIBERA SALCEDO.

(72) Inventor(es): ROMUALDO LUÍS RIBERA SALCEDO.

(86) Pedido PCT: PCT PT2008000024 de 30/04/2008

(87) Publicação PCT: WO 2008/147233 de 04/12/2008

(85) Data do Início da Fase Nacional: 30/10/2009

(57) Resumo: PROCESSO DE RECIRCULAÇÃO ELECTROSTÁTICA PARA DESPOEIRAMENTO E LAVAGEM DE GASES E RESPECTIVO DISPOSITIVO. A invenção respeita a um sistema de ciclones de recirculação electrostaticamente assistida, integrando um ciclone colector (Col) com diâmetro D1 e uma entrada de gases sujos (GS), disposto a montante de um recirculador (Con) com diâmetro D2 e um canal central de exaustão de gases limpos (GL), ciclones estes em série e com uma linha de recirculação, do concentrador para o colector, de parte do fluxo. Caracteriza-se por, no recirculador, haver meios de aplicação de alta tensão (AT) que formam um campo elétrico ionizante que influencia as poeiras que percorrem o recirculador, afastando-as do canal central de exaustão, sem provocar deposição sensível das mesmas nas paredes do recirculador. A densidade de corrente do campo ionizante, no recirculador, é inferior a 0,1 mA/m² e o campo elétrico médio a 2x105 V/m. Segundo o processo da invenção, as partículas são afastadas do canal central de exaustão, no recirculador, por acção combinada de forças mecânicas e elétricas, estas decorrentes do atravessamento, pelas partículas, do campo elétrico ionizante; provocando a concentração das partículas na parte do fluxo que é recirculada para o ciclone colector, onde parte delas é (...).

DESCRIÇÃO

SISTEMA DE CICLONES PARA DESPOEIRAMENTO E LAVAGEM DE GASES, RESPECTIVO PROCESSO E UTILIZAÇÃO

[001] Domínio técnico

[002] A presente invenção respeita a um sistema de ciclones de recirculação electrostaticamente assistida e enquadra-se no domínio dos equipamentos de despoeiramento e lavagem de gases. Da invenção faz também parte o processo correspondente a tal sistema.

[003] Estado anterior da técnica

[004] *Ciclones e recirculação*

[005] Os ciclones são despoeiradores utilizados em vários tipos de indústrias, com dois fins distintos: remoção de poeiras dos gases emitidos por processos, antes de serem libertados para a atmosfera (para controlo de poluição ou recuperação de matéria prima), ou utilização como reactores de lavagem de gases por injecção a seco de reagentes apropriados, sendo neste caso vulgarmente seguidos por filtros de mangas para recolha dos produtos de reacção e excesso de reagente.

[006] Os ciclones industriais são de vários tipos, sendo os mais utilizados os do tipo de fluxo invertido.

[007] Teoricamente, consegue-se aumentar a eficiência de um ciclone aumentando a velocidade de entrada dos gases, mas, na prática, há um limite de velocidade a partir do qual a eficiência de captura diminui. Isto é devido ao fenómeno de ressuspensão (Licht, 1980), fenómeno semelhante ao arrastamento de areias em dunas provocado por ventos fortes.

[008] Para reduzir ou eliminar o problema de ressuspensão, propôs-se a utilização de recirculação parcial dos gases e partículas não capturadas pelo ciclone (como referido na família de patentes PT102392, WO0141934,

US6733554, CA2394651 e EP1272278). Estes sistemas recorrem a ciclones de recirculação para despoeiramento e lavagem de gases – integrando um ciclone colector, de fluxo invertido, e um ciclone concentrador, de passo simples, dispostos em série e com recirculação – caracterizados por o colector se encontrar a montante do concentrador e por uma linha de recirculação de parte do fluxo em processamento do concentrador para o colector, sendo a recirculação assegurada por venturi, ventilador ou ejector (vide figura 1). Encontram-se instalados na indústria já vários sistemas que utilizam estes princípios (Salcedo e Pinho, 2002, 2003; Salcedo e Sousa Mendes, 2003; Salcedo et al., 2004), que conseguem remover todas as partículas com diâmetros superiores a ≈ 10 µm.

[009] A eficiência global destes sistemas é dada por:

$$\eta = \frac{\eta_{col}}{1 - \eta_{con} + \eta_{con}\eta_{col}} \qquad [1]$$

em que η_{col} e η_{con} são respectivamente as eficiências do colector e do concentrador.

[010] Verifica-se, assim, que a eficiência de um ciclone ou bateria de ciclones (vários ciclones em paralelo) pode ser incrementada por adopção de recirculação, em particular com um sistema de ciclone de fluxo invertido (colector) a montante de um ciclone de passo simples (concentrador).

[011] *Electrofiltros*

[012] Existem, desde o princípio do século passado (White, 1963), despoeiradores designados por electrofiltros (ou precipitadores electrostáticos) que utilizam forças eléctricas geradas por uma descarga de um fio condutor ligado a uma fonte de alta tensão (AT), geralmente de corrente contínua, e colocado simetricamente no eixo de um cilindro (electrofiltro tubular) ou equidistante de placas

paralelas (electrofiltro de placas). Quer o cilindro, quer as placas paralelas, são ligadas à terra e o campo eléctrico gerado é o responsável pelo carregamento eléctrico das partículas, maioritariamente com a mesma polaridade do fio de descarga. Essas partículas, no seu trajecto para a saída, são assim atraídas pelo cilindro ou pelas placas colectoras, de polaridade contrária à do fio de descarga, sendo aí capturadas e daí removidas, posteriormente, por martelos pneumaticamente actuados ou outros dispositivos vibradores ou por lavagem com um líquido apropriado (Oglesby e Nichols, 1978; Parker, 1997), caindo em tremonhas de onde são transportadas posteriormente.

[013] Um electrofiltro necessita assim de:

– um eléctrodo de descarga de reduzida curvatura (para se conseguir a ionização do gás a voltagens não exageradamente elevadas, da ordem dos 10–20 kV, dependendo da temperatura e da composição do gás a tratar), isolado do resto do equipamento e ligado a uma fonte de alta tensão, geralmente de corrente contínua até 70kV;

– um eléctrodo de captura de elevada curvatura (cilindro ou placas paralelas), ligado à terra e criando assim uma grande diferença de potencial relativamente ao eléctrodo de descarga;

– um sistema de lavagem, de vibração ou de percussão do eléctrodo de captura, para remoção, por gravidade, das poeiras aí depositadas;

– um sistema de tremonhas para colecta e transporte das poeiras para fora da instalação.

[014] No caso dos electrofiltros tubulares, de geometria cilíndrica ou semelhante (p. ex., de secção hexagonal), as poeiras são geralmente removidas das paredes por lavagem com um líquido apropriado, para impedir a sua

reentrada no gás que está a ser despoeirado, pelo que estes equipamentos são sempre dispostos na vertical, com o gás a despoeirar a entrar por baixo e a sair por cima (White, 1963; Oglesby e Nichols, 1978; Parker, 1997). No caso dos electrofiltros de placas paralelas, a utilização de líquidos para remoção das poeiras é mais rara, mas a disposição destas também é sempre vertical.

[015] Para um electrofiltro tubular funcionar correctamente segundo o modo tradicional, isto é, como colector de partículas, é necessário que ocorra a conjugação dos seguintes factores:

1. Deve haver uma fonte de alta tensão de corrente contínua, que, na prática, se traduz no emprego de voltagens inferiores a 60–70 kV (Parker, 1997);
2. O eléctrodo de descarga deve ter reduzido raio de curvatura, o que, na prática, se traduz, para fios cilíndricos, em diâmetros entre 1–3 mm, sendo utilizados em geral diâmetros entre 2–3 mm (Parker, 1997), sendo que, quanto menor o diâmetro do fio de descarga, mais baixa será a voltagem para a qual se inicia a ionização do gás (White, 1963; Parker, 1997), mas menor será o campo eléctrico junto ao eléctrodo colector (o que tenderá a baixar algo a eficiência de captura);
3. O eléctrodo colector deve ter elevado raio de curvatura, o que, na prática, se traduz no emprego de câmaras cilíndricas (ou hexagonais), dispostas verticalmente, com o gás a tratar a entrar por baixo e a sair por cima;
4. Tem de haver um correcto espaçamento entre os

eléctrodos emissor e colector, para produzir elevados campos eléctricos (≈5x10^5 V/m) e elevadas velocidades de migração das partículas para o eléctrodo colector (≈0,1–1 m/s para diâmetros das partículas entre 0,1–10 µm; Parker, 1997), empregando-se, na prática – em electrofiltros tubulares – espaçamentos entre 150–250 mm;

5. Tem de haver um tempo de residência suficiente (comprimento da placa colectora elevado ou, em alternativa, baixa velocidade do gás a tratar), o que, na prática, se traduz em velocidades médias do gás da ordem de 1,5–2,5 m/s;
6. Tem de haver meios auxiliares para a remoção das partículas capturadas nas paredes cilíndricas, nomeadamente através de vibração, percussão ou lavagem das paredes, com recolha das poeiras na base do tubo cilíndrico;
7. As partículas têm de possuir propriedades eléctricas adequadas, principalmente no que se refere à sua resistividade eléctrica (rapidez de descarga das cargas acumuladas), não devendo ser nem pouco resistivas (<10^6 Ohm·m), para evitar uma descarga demasiado rápida e a ressuspensão no gás, nem demasiado resistivas (>10^9 Ohm·m), para evitar campos eléctricos demasiado elevados na camada de poeiras depositada nas paredes do eléctrodo colector (White, 1963; Salcedo, 1981), uma vez que qualquer destes fenómenos diminuirá a eficiência de captura.

[016] Há também ciclones de fluxo invertido (sem

qualquer sistema de recirculação) directamente electrificados (Lim et al., 2001; Shrimpton e Crane, 2001; Lim et al., 2004), nos quais o campo eléctrico é aplicado directamente ao ciclone de fluxo invertido, com o objectivo de aumentar a sua eficiência de captura (que, no caso da equação [1], é $\eta = \eta_{col}$).

[017] Um exemplo deste tipo de concepções encontra-se descrito na patente US6355178 B1. Em particular, nas figuras 4 e 5 dessa patente e na correspondente descrição, descreve-se um ciclone de fluxo invertido para despoeiramento de gases, no qual é providenciada uma zona isoladora de corte eléctrico, que separa a parte de cima do ciclone da parte de baixo. É gerada uma diferença de potencial eléctrico entre essas duas partes, com o objectivo de carregar as partículas, na parte superior do ciclone, e de as capturar nas paredes da parte inferior do mesmo. Segundo duas primeiras variantes, representadas nas figuras 11 e 15 da mesma patente, há um pré-carregador das partículas a montante do ciclone colector (de fluxo invertido) por onde passa previamente todo o fluxo de ar a tratar. Uma vez mais o objectivo é capturar as partículas nas paredes do ciclone de fluxo invertido. Numa alternativa de concretização particular (representada na figura 13 da mesma patente), aproveita-se o tubo de vórtice para carregar electricamente as partículas que entram no ciclone; numa outra alternativa (representada na figura 12 da mesma patente), o pré-carregador é implementado como um eléctrodo de descarga inserido longitudinalmente na conduta de admissão. Também no caso destas alternativas o objectivo é igualmente a captura das partículas nas paredes do ciclone. Finalmente, numa terceira alternativa (representada na figura 14 da mesma patente), o eléctrodo de descarga (fio) é disposto longitudinalmente dentro do

ciclone de fluxo invertido. As variantes e concretizações discutidas implicam, genericamente, o recurso a dispositivos adicionais de geração de vibração do ciclone (por meios mecânicos, pneumáticos ou eléctricos) eventualmente complementados com meios de vibração por ondas sonoras ou por ultra-sons, em qualquer dos casos para permitir o descolamento das partículas carregadas aprisionadas nas paredes do ciclone. Exemplos de tais meios complementares encontram-se representados nas figuras 16 e 17 da mesma patente. Para além do inconveniente de ter de se recorrer aos ditos meios complementares de vibração, por as partículas serem capturadas nas paredes do ciclone de fluxo invertido, acresce que, no caso das alternativas discutidas acima em relação às figuras 13 e 14 da dita patente US6355178, o efeito dos elementos carregadores das partículas é expectavelmente muito pequeno, pois, para as dimensões normais dos ciclones, tais elementos não terão comprimento suficiente para influenciar significativa-mente a carga das partículas. No caso da terceira alternativa acima indicada, a parte exposta do fio não pode ficar demasiado próxima do fundo do cone sob pena de se formarem arcos eléctricos directos entre o eléctrodo e a parede do ciclone colector. No caso de as alturas (comprimentos) dos elementos em jogo serem aumentadas, para que a sua influência sobre as partículas aumente, tal representa recorrer a ciclones com muito maior atravancamento ou adoptar configurações desproporcionadas relativamente aos ciclones de maior eficiência e, portanto, intrinsecamente menos eficientes. Aliás, desconhecem-se aplicações concretas, à escala industrial (e não meramente laboratorial e/ou de testes piloto), de aparelhos funcionando segundo o princípio enunciado.

[018] *Aglomeradores*

[019] A patente US4718923 respeita a um aglomerador electrostático de partículas de fuligem no seio de uma corrente gasosa, com vista ao aumento do tamanho das mesmas (por aglomeração das partículas entre si) e à sua subsequente remoção da dita corrente por meio de um separador centrífugo, nomeadamente um ciclone.

[020] O fluxo gasoso passa, todo ele, primeiro por aglomeradores electrostáticos, configurado como tubos aglomeradores electrostáticos em paralelo, e depois (também todo ele) pelos separadores centrífugos, configurados como uma bateria de ciclones (eventualmente de fluxo invertido) dispostos em paralelo e em correspondência com os tubos aglomeradores, a jusante destes.

[021] Os tubos aglomeradores são bipolares e cada um deles compreende um eléctrodo de descarga disposto longitudinalmente, provido de placas transversais e ligado a um polo negativo e electricamente isolado do tubo propriamente dito, tubo este que é ligado a um terminal positivo. Uma elevada diferença de potencial é estabelecida entre os dois pólos. Embora o princípio físico subjacente ao funcionamento do dispositivo não seja explicado no dito documento, presume-se que a aglomeração das partículas resulte primeiramente da deposição das mesmas nas paredes dos tubos aglomeradores electrostáticos durante um determinado período e, depois, da libertação dos agregados depositados nessas paredes por vibração do dispositivo (decorrente da vibração do correspondente veículo) ou acção mecânica equivalente. Seja como for, a aglomeração das partículas entre si, com o aumento do seu tamanho, é o efeito pretendido, conforme se visualiza nas figuras dessa patente.

[022] Uma vez que os separadores centrífugos são mais eficientes na separação de partículas de maior dimensão

(maior massa), a ideia subjacente ao dispositivo em causa é a de provocar o aumento do tamanho das partículas, por aglomeração, antes de as fazer passar pelo separador centrífugo. A globalidade do fluxo gasoso que entra no separador centrífugo (configurado, nomeadamente, como ciclone de fluxo invertido) é previamente processada no aglomerador disposto a montante do separador. O gás expelido pela conduta de saída de gases "limpos" do separador centrífugo é todo ele libertado sem qualquer tipo de recirculação subsequente, seja total seja parcial.

[023] O mesmo princípio preside igualmente ao funcionamento e concepção do dispositivo da patente US5458850.

[024] A patente US6004375 também respeita a um aglomerador de partículas. Não está prevista qualquer recirculação. O problema reside, como nos outros aglomeradores, em aglomerar partículas de modo a aumentar a sua dimensão, para depois as poder captar mais facilmente. Pretende-se também controlar as características das partículas aglomeradas, seja quanto à concentração das partículas aglomeradas, seja quanto à estrutura de tais partículas aglomerados, seja ainda quanto à dimensão das partículas aglomeradas obtidas. O dispositivo é bipolar e os eléctrodos são pares de agulhas opostas dispostas radialmente em relação ao fluxo gasoso. Evita-se que no caso de haver uma combinação incompletas das partículas inversamente carregadas, tais partículas sofram um desvio na dita direcção radial.

[025] *Lavadores*

[026] São bem conhecidos lavadores específicos de gases que utilizam injecção a seco de pós reactivos, mas que têm elevados custos de investimento e operação (Carminati et al., 1986; Heap, 1996), quando comparados com ciclones que

são utilizados como reactores para o mesmo fim (Fonseca et al., 2001).

[027] Objectivos do invento

[028] A presente invenção tem por objectivo um processo e um dispositivo de elevada eficiência para despoeirar que apresente uma eficiência notoriamente acrescida – mormente na captura de partículas de diâmetro inferior a 10 µm – em relação aos dispositivos preconizados no dito documento WO0141934.

[029] Pretende-se ainda que tal dispositivo possa operar eficazmente com partículas fora da gama de resistividade típica dos electrofiltros, ou seja, fora do intervalo $[10^6;10^9]$, expressa em Ohm·m, e que seja de concepção simples, versátil e de baixo custo, mormente em comparação com os electrofiltros, nomeadamente suprimindo os dispositivos destinados, nos electrofiltros convencionais, a remover compulsivamente as partículas depositadas nas paredes destes.

[030] Um objectivo adicional é que os custos operatórios de funcionamento sejam iguais ou mesmo inferiores aos dos sistemas com recirculação preconizados em WO0141934.

[031] Outro objectivo é que os custos de investimento (produção e montagem) sejam inferiores aos dos sistemas do estado da técnica comparáveis em termos de eficiência e que o dispositivo segundo a invenção possa ser usado no tratamento e/ou na lavagem de gases a altas temperaturas e ainda que o atravancamento não seja exagerado para aplicações industrias típicas, sendo comparável ao do dispositivo descrito em WO0141934, sem perda da possibilidade de dispor o concentrador segundo a orientação espacial ditada pela envolvente industrial, ou seja, não necessariamente na vertical, contrariamente ao que acontece

no caso dos electrofiltros tubulares.

[032] É também um objectivo da presente invenção um processo de despoeirar de elevada eficiência e elevado espectro de aplicação, mormente em termos da gama de resistividade admitida para as partículas a remover dos fluxos gasosos.

[033] É ainda um objectivo da presente invenção o despoeiramento e lavagem (a seco) eficazes de gases ácidos e o despoeiramento eficaz de gases de queima de motores diesel.

[034] Outros objectivos adicionais ressaltarão da restante descrição e das próprias reivindicações.

[035] Descrição da invenção

[036] Contrariamente aos aglomeradores, cujo princípio é o de provocar o aumento do tamanho das partículas com vista à sua subsequente recolha num separador (nomeadamente centrífugo), e aos electrofiltros convencionais (ou mesmo aos ciclones de fluxo invertido electrificados), cujo princípio é o de separar e capturar no próprio dispositivo electrificado as partículas presentes na corrente gasosa, a presente invenção preconiza um dispositivo do tipo do da citada patente WO0141934 mas no qual o concentrador é configurado como um recirculador electrostático.

[037] Verifica-se que, embora os elementos constituintes sejam essencialmente os mesmos do estado anterior da técnica – envolvendo um ciclone de fluxo invertido (colector) a montante de um ciclone de passo simples (concentrador) – a inclusão de recirculação electrostá-tica, não com o objectivo de capturar as partículas no recirculador (concentrador de passo simples), nem de as aglomerar entre si, mas antes com o objectivo de as concentrar na corrente de recirculação ao ciclone de fluxo invertido (este sim, que é o colector), aumentando

significativamente o termo η_{con} na equação [1], permitirá obter eficiências de captura (η) significativamente superiores às obtidas apenas com recirculação mecânica. Esta adição ao ciclone de passo simples (concentrador) transformando-o num recirculador electrostático é esquematicamente mostrada na figura 2.

[038] Embora nessa representação esquemática haja uma aparente semelhança entre o recirculador electrostático e um electrofiltro convencional, o certo é que essa semelhança é meramente ilusória.

[039] De facto, seria manifestamente contraproducente utilizar o recirculador como um electrofiltro, pois a captura das poeiras na sua parede deve ser minimizada ou, preferivelmente, anulada por completo, enquanto que nos electrofiltros tal se pretende maximizar. No caso do recirculador electrostático, pretende-se apenas afastar as poeiras do canal de exaustão central do recirculador, fazendo-as aproximar das paredes do cilindro (sem que contudo se fixem aí), de modo a que se concentrem na saída tangencial, que é o retorno ao ciclone de fluxo invertido (colector).

[040] Assim, a eficácia da recirculação pode ser incrementada por implementação, no recirculador (concentrador), de um campo eléctrico de corrente contínua, desde que os eléctrodos sejam devidamente dimensionados para impedir que o recirculador funcione como um electrofiltro, isto é, para impedir ou minimizar a deposição das poeiras nas suas paredes.

[041] Em síntese, pode dizer-se que se o recirculador electrostático preconizado segundo a invenção fosse materializado por um electrofiltro, a recirculação (parcial) dos gases ao ciclone colector de fluxo invertido tornar-se-ia substancialmente inútil, para além do que o

dispositivo herdaria os inconvenientes acima referidos associados aos electrofiltros, como, por exemplo, a obrigatoriedade de disposição vertical (electrofiltros tubulares), a necessidade de complexos meios auxiliares para remoção de partículas e a limitação do tipo de partículas susceptíveis de serem filtradas em função da respectiva resistividade eléctrica (compre-endida numa gama relativamente apertada).

[042] Por outro lado, a introdução, no ciclone colector, de qualquer electrificação, conforme ocorre na dita patente US6355178, é inconveniente pelos motivos anteriormente expostos.

[043] Segundo a abordagem inovadora da invenção, conseguem-se sistemas de despoeiramento, constituídos por ciclones, que simultaneamente são mais eficientes do que os existentes no mercado, com custos de investimento e operatórios semelhantes, mantendo um atravancamento limitado e que podem ser utilizados a muito elevadas temperaturas ou para lavagem de gases, respondendo às solicitações ambientais de limites de emissão cada vez mais apertados.

[044] O presente invento cumpre o objectivo principal de aumentar a eficiência dos sistemas de ciclones com recirculação, recorrendo a forças eléctricas para concentrar próximo das paredes do recirculador as partículas que escapam ao ciclone de fluxo invertido (colector), minimizando no entanto a sua deposição em tais paredes. O fluxo concentrado de poeiras sairá tangencialmente do recirculador, sendo reciclado com uma fracção do gás (≈ 20% a 30%) ao ciclone colector.

[045] A presente invenção respeita também à disponibilização de um processo com eficácia acrescida para o despoeiramento de fluxos gasosos, bem como a um processo

de eficácia também acrescida para a lavagem a seco de compostos gasosos de um fluxo gasoso.

[046] Segundo o processo da invenção, faz-se o fluxo gasoso atravessar um ciclone colector de fluxo invertido, onde são capturadas parte das partículas transportadas nesse fluxo, fazendo-o seguidamente atravessar um ciclone concentrador (recirculador) de passo simples dotado de um canal central de exaustão de gases limpos, ciclone este onde parte das partículas remanescentes no fluxo são concentradas e recirculadas, com parte desse fluxo, de novo para o dito ciclone colector. Tal processo caracteriza-se por as partículas que passam pelo recirculador serem afastadas do canal central de exaustão por acção de uma combinação de forças mecânicas (de inércia) e eléctricas, estas últimas decorrentes do atravessamento, por parte das ditas partículas, de um campo eléctrico ionizante de alta tensão, afastamento que provoca a concentração das partículas – sem deposição das mesmas nas paredes do concentrador – na parte do fluxo que é recirculada para o ciclone colector, onde parte das partículas recirculadas é capturada.

[047] Assim, o aumento da eficiência é conseguido à custa do aumento da proporção de partículas que volta ao ciclone de fluxo invertido (colector). Portanto, aumenta-se o η na equação [1], aumentando o η_{con}, mediante a introdução de forças eléctricas no recirculador (concentrador), em apoio das forças simplesmente mecânicas existentes no concentrador do dispositivo segundo WO0141934. Contudo, paradoxal-mente, se em vez do recirculador (concentrador) fosse usado um electrofiltro, as partículas seriam capturadas no próprio electrofiltro e, como tal, diminuiria (praticamente para zero) a proporção de partículas que retornaria ao ciclone de fluxo invertido

(colector), pelo que o sistema deixaria de funcionar segundo a equação [1] e o rendimento global do sistema tenderia a ser praticamente igual ao rendimento do electrofiltro, pelo que toda a parte respeitante ao ciclone de fluxo invertido e à linha de recirculação seria praticamente inútil. Acresce que, não se evitaria a maior parte dos inconvenientes atrás mencionados inerentes aos electrofiltros.

[048] Face ao exposto, verifica-se que, segundo a invenção, os ditos objectivos são atingidos recorrendo a ciclones de recirculação para despoeiramento e lavagem de gases – integrando um ciclone colector, de fluxo invertido, e um ciclone concentrador (recirculador), de passo simples e com canal central de exaustão de gases limpos, ciclones estes dispostos em série e com recirculação, encontrando-se o colector a montante do concentrador e havendo uma linha de recirculação de parte do fluxo em processamento do concentrador para o colector – caracterizados por, no recirculador, haver meios eléctricos de aplicação de alta tensão, formando um campo eléctrico ionizante que influencia as poeiras que percorrem o recirculador, afastando-as do dito canal central de exaustão, sem contudo provocar deposição sensível das mesmas nas paredes do recirculador.

[049] Segundo a invenção, os meios eléctricos de aplicação de alta tensão são constituídos por um eléctrodo ou eléctrodos de descarga disposto(s) segundo o eixo longitudinal do concentrador (recirculador), eléctrodo(s) esse(s) isolado(s) electricamente, de modo em si mesmo conhecido, na zona de atravessamento da parede do concentrador, parede esta electricamente ligada à terra de modo a estabelecer-se uma elevada diferença de potencial entre a mesma e o(s) dito(s) eléctrodo(s) de descarga,

combinando-se a tensão aplicada ao fio de descarga, o diâmetro do(s) eléctrodo(s) de descarga e a distância entre este(s) e a parede do concentrador – distância esta dependente do diâmetro nominal (D_2) do concentrador – de modo a originar uma densidade de corrente inferior a cerca de 0,1 mA/m^2. O eléctrodo de descarga pode ser materializado por um fio condutor.

[050] Não obstante, segundo a invenção, interessar sobretudo reciclar as poeiras que não são capturadas no ciclone de fluxo invertido (colector), prevê-se que, devido à maior concentração de poeiras próximo das paredes do recirculador, seja necessário e até benéfico reciclar uma menor fracção de gás (≈20% a 30% contra os 30-40% utilizados na recirculação exclusivamente mecânica), pelo que os custos operatórios serão inclusive inferiores, uma vez que as forças eléctricas apenas se aplicam às poeiras e não ao gás. De facto, enquanto que para reciclar 30-40% de um caudal de 50 000 m^3/h são necessários ≈18-25 kW de potência no ventilador de recirculação, para reciclar 20% do mesmo caudal serão apenas necessários 12 kW, já incluindo a potência eléctrica necessária para induzir recirculação electrostática por aplicação de um campo eléctrico ionizante no recirculador. A poupança energética na recirculação será superior a 35%, o que é substancial.

[051] Assim, é também paradoxal que, embora o sistema da presente invenção adicione componentes eléctricos de alta voltagem ao sistema de recirculação exclusivamente mecânica preconizado em WO0141934, o consumo energético total seja inferior ao deste.

[052] Breve descrição das figuras

[053] A figura 1 constitui uma representação esquemática de um sistema de ciclones com recirculação exclusivamente mecânica.

[054] A figura 2 constitui uma representação esquemática do dispositivo segundo a invenção.

[055] A figura 3 representa um gráfico de eficiências globais (η) para o sistema da figura 2.

[056] A figura 4 representa um gráfico de eficiências fraccionais para os concentradores das figuras 1 e 2 (curvas 1 e 2, respectivamente).

[057] As figuras 5 e 6 mostram como o efeito da diferente geometria (resultante da distância intereléctrodos) do concentrador electrostático segundo a invenção (linha contínua) o torna tão distinto de um electrofiltro tradicional (pontos).

[058] As figuras 7-8 mostram as diferenças de eficiências obtidas entre ciclones de elevada eficiência, segundo EP0972572, isolados (0), ciclones segundo WO0141934 com recirculação meramente mecânica (1) e ciclones segundo a invenção (2).

[059] A figura 9 mostra os diferentes diâmetros de corte para os dispositivos da figuras 7-8.

[060] A figura 10 mostra o incremento médio na eficiência de captura obtido pelo dispositivo segundo a invenção (2).

[061] As figuras 11-13 mostram o incremento de eficiência obtido em ensaios concretos com três tipos distintos de poeiras.

[062] A figura 14 mostra o resultado comparativo entre um simples ciclone de fluxo invertido (0), um dispositivo de ciclones com recirculação meramente mecânica (1) e um dispositivo segundo a invenção (2), na captura de bactérias do ar ambiente.

[063] Descrição detalhada da invenção

[064] A figura 1 constitui uma representação esquemática de um sistema de ciclones com recirculação

exclusivamente mecânica, constituído por um ciclone de fluxo invertido, denominado colector (Col), por um ciclone de passo simples denominado concentrador (Con) que se lhe segue e por um sistema de recirculação por ventilador, venturi ou ejector, conforme descrito no estado anterior da técnica.

[065] A figura 2 constitui uma representação esquemática do dispositivo segundo a invenção, constituído por um ciclone de fluxo invertido, denominado colector (Col), seguido de um ciclone de passo simples, denominado concentrador ou recirculador electrostático (Con), electrificado com alta tensão de corrente contínua (AT) – com a indicação dos diâmetros nominais do colector e do concentrador (D_1, D_2) – e por um sistema de recirculação, que pode ser um ventilador, venturi ou ejector. Tal representação, tem, obviamente, carácter meramente exemplificativo e não limitativo, vendo-se aí a entrada do gás sujo (GS) a saída das poeiras capturadas (P) e a saída do gás limpo (GL)

[066] Conforme se verifica, a principal diferença em relação aos ciclones com recirculação do estado anterior da técnica (com circulação meramente mecânica) – representados na figura 1 – reside na electrificação do concentrador. Contudo, a tensão aplicada (AT) ao fio de descarga, o diâmetro do eléctrodo de descarga e a distância entre este e a parede do concentrador combinam-se de modo a originar uma densidade de corrente inferior a cerca de 0,1 mA/m^2, o que dota o dispositivo de características completamente distintas das de um vulgar electrofiltro.

[067] O conceito da invenção é demonstrado nas figuras 3 e 4.

[068] A figura 3 representa um gráfico de eficiências globais (η) para o sistema da figura 2, mostrando que a

eficiência do sistema é sempre superior à do colector isolado (η_{col}) e que, quanto maior for a eficiência do concentrador (η_{con}), tanto maior a eficiência (η) do sistema.

[069] A figura 4 representa um gráfico de eficiências fraccionais – eficiência em função do tamanho das partículas [diâmetro (Φ)] – para os concentradores das figuras 1 e 2 (curvas 1 e 2, respectivamente), revelando que a eficiência de recirculação electrostática (η) é muito superior à da recirculação meramente mecânica (η), enquanto que a deposição nas paredes (η) para as partículas finas é desprezável (curva 3). Esta figura foi obtida por simulação utilizando resultados obtidos numa instalação industrial com recirculação mecânica e extrapolando para recirculação electrostática através de teorias apropriadas (Salcedo, 1981).

[070] Verifica-se, por tal figura, que com um concentrador electrostático segundo a invenção (que também tem vindo aqui a ser denominado recirculador electrostático) a deposição nas paredes (curva 3) é desprezável para partículas finas (que são as que mais escapam ao ciclone colector e que entram no concentrador) e que há um incremento notável na eficiência de recirculação ao ciclone de fluxo invertido, sendo a eficiência da recirculação electrostática (curva 2) muito superior à eficiência de recirculação meramente mecânica (curva 1), para as partículas submicrométricas, aumentando assim o termo η_{con} na equação [1].

[071] Por seu turno a figura 3 mostra o efeito benéfico do aumento deste termo η_{con} no rendimento global η.

[072] O conceito proposto, de recirculação electrostática, embora recorra a um componente – o recirculador electrostático – que, quando representado esquematicamente (figura 2), tem

semelhança aparente com os electrofiltros, apresenta diferenças substanciais relativamente aos electrofiltros convencionais, desde logo traduzidas na curva 3 da figura 4. Outras diferenças são as seguintes:

1. Os electrofiltros tubulares são verticais, para as poeiras capturadas nas paredes cilíndricas serem removidas pela base. O recirculador proposto pode ser orientado em qualquer posição, incluindo na horizontal, pois não se pretende que funcione como colector de poeiras.
2. Os electrofiltros tubulares têm um sistema de percussão/vibração ou de lavagem para remoção das poeiras. Tal não é o caso do concentrador proposto, que não necessita de dispositivo de remoção de poeiras.
3. Os electrofiltros tubulares têm uma tremonha para colecta das poeiras desalojadas das suas paredes. O concentrador proposto não necessita de tremonha pois não é um colector (este serviço é deixado para o ciclone de fluxo invertido localizado a montante do concentrador).
4. Os electrofiltros tubulares têm um campo eléctrico elevado, ($>5x10^5$ V/m), de modo à densidade de corrente ser elevada (>1 mA/m^2), conduzindo a uma elevada velocidade de migração das partículas (w) para o eléctrodo colector (≈0,1–1 m/s para diâmetros das partículas entre 0,1–10 µm) e a eficiências de captura também elevadas (>95%). Isto consegue-se com espaçamentos entre os eléctrodos próximos de 200 mm (tipicamente entre 150–250

mm; Parker, 1997), para tensões aplicadas máximas na ordem dos 60–70 kV. Tal não é o caso do recirculador proposto, em que o espaçamento entre eléctrodos é muito elevado (≈450–600 mm). Aplicando tensões máximas da ordem dos 50 kV, o campo eléctrico produzido é baixo (<$2x10^5$ V/m), com densidades de corrente baixas (<0,1 mA/m^2), conducentes a baixas velocidades de migração das partículas para as paredes (≈0,01–0,05 m/s para diâmetros das partículas entre 0,1–10 μm) e muito baixas eficiências de retenção (idealmente, a eficiência de retenção das poeiras nas paredes do recirculador deve ser nula).

5. Se avariar a componente electrostática do sistema de recirculação electrostático segundo a invenção, continua em operação a recirculação mecânica. Ao invés, avarias no sistema eléctrico de um electrofiltro são fatais, impedindo a sua utilização como despoeirador.

[073] A tabela I, abaixo, resume estas diferenças.

TABELA I

Tipo	Orientação	Tre-monha	Remoção das partículas	Espaça-mento entre eléctro-dos	Campo eléctrico médio
				mm	V/m
Electrofiltro tubular	Vertical	Sim	Percussão, vibração ou lavagem	150–250 (200)	> $5x10^5$
Recirculador electrostático	Qualquer	Não	Não	450–600	< $2x10^5$

Diferenças significativas entre electrofiltro tubular (Parker, 1997) e recirculador electrostático segundo a invenção

TABELA I (continuação)

Tipo	Densidade de corrente	Velocidade de migração (w) (*)	Sensibilidade a resistividade muito baixa ou elevada das partículas
	mA/m^2	m/s	Ohm·m
Electrofiltro tubular	> 1	0,1–1	Elevada para o intervalo ($<10^6$ ou $>10^9$)
Recirculador electrostático	< 0,1	0,01–0,05	Nula

(*) – para diâmetros de partículas entre 0,1–10 μm

TABELA I (continuação)

Tipo	Sensibilidade à avaria eléctrica	Eficiência típica de retenção de partículas (**)
		%
Electrofiltro tubular	Máxima	> 95
Recirculador electrostático	Baixa (funciona a recirculação mecânica)	< 10

(**) – para distribuição típica emitida por caldeiras de biomassa (resíduos de madeira)

[074] A figura 5 mostra que, no caso do concentrador electrostático, a velocidade de migração (w) das partículas – num amplo espectro de diâmetros (Φ) – para as paredes apenas toma valores próximos dos obtidos com electrofiltros (Parker, 1997) se a voltagem aplicada for superior a 200 kV.

[075] A figura 6 mostra que, no caso do concentrador

electrostático, a eficiência de retenção (η) das partículas – em função do tamanho das mesmas [diâmetro (Φ)] – nas paredes (que, no caso da invenção, se pretende minimizar) apenas toma valores tendencialmente mais próximos dos obtidos com electrofiltros se a voltagem aplicada for superior a 200 kV.

[076] Nas figuras 5 e 6 os pontos representam valores típicos para electrofiltros (Parker, 1997), a curva a contínuo representa o dispositivo segundo a invenção, funcionando a 50kV, e a curva a traço interrompido a tensão, da ordem de 200kV, que seria necessário aplicar (simulação) ao dispositivo segundo a invenção, para aproximar o seu comportamento ao de um electrofiltro convencional em termos quer de velocidades de migração das partículas, quer de eficiência de captura nas paredes, respectivamente.

[077] As ditas figuras 5 e 6 mostram que para se conseguirem valores de velocidades de migração (w) e de eficiência de retenção (η) típicos de electrofiltros (Parker, 1997), seria necessário operar o recirculador preconizado na invenção a cerca de 200–300 kV. Voltagens tão elevadas nunca são utilizadas em electrofiltros industriais, por razões de custo e de segurança.

[078] Por seu turno, as diferenças entre o dispositivo segundo a invenção (em que o concentrador é electrificado) e os colectores (ciclones de fluxo invertido) electrificados do estado anterior da técnica, são espelhadas na tabela II, abaixo, que dá os diâmetros – e correspondentes volumes – necessários para se ter um fio de descarga com comprimento, entre o final do tubo de vórtice e o início do cone, de 2,7m, comprimento este considerado como sendo um valor típico para o comprimentos do fio de descarga num concentrador electrostático (recirculador)

segundo a invenção destinado a aplicação industrial, considerando um concentrador electrostático com diâmetro nominal (D_2) de 0,6m e correspondente volume de 1,13m^3).

[079] Tab. II – Diâmetro nominal e volume de 3 tipos de ciclones para comprimento de fio de descarga de 2,7 m

Tipo de Ciclone	Diâmetro (m)	Volume (m^3)
Lapple (baixa eficiência)	1,964	12
Stairmand_HE (alta eficiência)	2,700	31
EP0972572 (muito alta eficiência)	5,050	154

[080] O volume necessário para manter o efeito electrostático aumenta brutalmente à medida que se procura usar ciclones mecanicamente mais eficientes. A associação, num ciclone de fluxo invertido, entre a captura meramente mecânica e a captura mista (mecânica e electrostática) não é industrialmente prática pois implica recorrer a ciclones com atravancamentos exagerados ou então a sacrificar a eficiência mecânica dos mesmos, aproximando-os portanto de simples electrofiltros.

[081] Conforme anteriormente explicado, o concentrador (recirculador electrostático) segundo a invenção é atravessado no seu comprimento, total ou parcialmente, por um eléctrodo ou sistema de eléctrodos de descarga, ligado(s) a uma fonte de alta tensão, e devidamente isolado(s) electricamente. A descarga dá-se apenas no concentrador (recirculador), devendo as suas paredes, assim como o ciclone colector e as tubagens ser devidamente ligados à terra.

[082] Os três componentes estão ligados do seguinte modo: O gás a despoeirar ou lavar entra no ciclone de fluxo invertido, que captura algumas partículas. As partículas que escapam seguem com a totalidade do gás para o ciclone

concentrador (recirculador electrostá-tico), onde uma pequena parte do gás com parte substancial das partículas remanescentes é recirculada ao ciclone de fluxo invertido através do ventilador, venturi ou ejector, sendo essa parte substancial das partículas concentrada mais eficientemente pelo apoio dado à concentração simplesmente mecânica, pela concentração electrostática resultante do campo inonizante que as partículas atravessam. O concentrador deve operar a uma tensão que permita a existência de corrente eléctrica entre o(s) eléctrodo(s) de descarga e as paredes do mesmo, mas que minimize a deposição de partículas nestas. Tal é obtido para densidades de corrente de aproximadamente 0,1 mA/m^2 ou menos.

[083] Para entender melhor os fenómenos envolvidos, o sistema proposto foi simulado através de um programa de computador baseado na teoria de difusividade finita de Mothes e Loffler (1988) que é a melhor teoria presentemente disponível para simulação (a nível de diagnóstico) de ciclones de fluxo invertido. Como este modelo necessita de previsões sobre as difusividades turbulentas das partículas, estas foram obtidas através de uma correlação adequada (Salcedo e Coelho, 1999). A figura 4 mostra a previsão de curvas de eficiência fraccional (eficiência em função do diâmetro da partícula) para o sistema proposto, comparado com o concentrador mecânico simples, para um sistema à escala industrial, ambos a tratarem as mesmas partículas e com o mesmo caudal de gás, verificando-se um aumento na eficiência de recirculação significativo para a maior parte das poeiras finas. Isto faz com que a eficiência global do sistema aumente significativamente. Por exemplo, utilizando os dados que serviram de suporte à elaboração da figura 4, prevê-se que, com recirculação simplesmente mecânica, a eficiência global do sistema, η,

seja de 83,2%, enquanto que para a recirculação electrostática este valor deve subir para 94,7%, conduzindo a reduções nas emissões de 68%.

[084] Como a acção electrostática no concentrador é favorecida por um maior tempo de carregamento das partículas, interessa trabalhar a velocidades pouco elevadas dos gases, pelo que a queda de pressão total e consequentemente os custos operatórios são reduzidos face aos dos sistemas de recirculação não electrificada. A utilização de um venturi para recirculação permite a utilização do sistema a temperaturas muito elevadas, desde que os caudais sejam pequenos. Para caudais mais elevados pode-se utilizar ejectores apropriados ou um ventilador secundário. Estes sistemas podem também ser utilizados para a lavagem económica de gases ácidos, a seco, pela recirculação de reagente sólido parcialmente convertido a produto.

[085] Processos eficazes de despoeiramento de um fluxo gasoso ou de despoeiramento e lavagem de compostos gasosos – mormente gases ácidos, designadamente de HCl (cloreto de hidrogénio), HF (fluoreto de hidrogénio), SO_2 (dióxido de enxofre) e/ou NO_x (óxidos de azoto) – de um fluxo gasoso, são obtidos fazendo tais fluxos atravessar um dispositivo de ciclones em série, em que o colector precede o concentrador electrificado e em que há realimentação parcial deste para aquele, havendo ainda, no caso da lavagem, introdução (não representada nas figuras) de um reagente (por exemplo, em pó) a montante do colector ou a montante do ventilador, venturi ou ejector.

[086] Conforme atrás indicado, a eficiência do sistema segundo o presente invento é sempre superior à eficiência dos sistemas do estado anterior da técnica (figuras 3 e 4) em que o concentrador não é electrificado. Os exemplos

práticos que adiante serão dados, corroboram o aumento da eficiência (figuras 7-9).

[087] O sistema segundo a invenção pode ainda ser utilizado, com grande vantagem, em vez dos reactores actualmente existentes [secadores do tipo "spray" (pulverizador) ou reactores venturi] para a lavagem a seco de gases ácidos, sendo possível projectar unidades extremamente compactas e com elevadíssimas eficiências, quer na remoção dos gases, quer na utilização dos reagentes sólidos injectados como um pó, devido à recirculação eficiente do reagente não utilizado.

[088] O sistema segundo a invenção apresenta também as seguintes vantagens:

- O recirculador electrostático pode ser utilizado em qualquer orientação, inclusive na horizontal;
- Não necessita de sistemas complicados de remoção das partículas das suas paredes, pois a deposição nas mesmas é intrinsecamente minimizada, designadamente pelo elevado espaçamento entre eléctrodos característico do dispositivo segundo a invenção;
- Não necessita de tremonha para colecta das partículas, pois tal é relegado para o ciclone de fluxo invertido;
- Utiliza níveis de voltagem correntemente aplicados em electrofiltros, ou inferiores;
- Não sofre de problemas devidos quer a baixa quer a elevada resistividade das partículas;
- Tem a possibilidade de recirculação através de ventilador, venturi ou ejector;
- Tem a possibilidade de utilização para despoeiramento e/ou lavagem a seco de gases;

- Tem a possibilidade de utilização a muito elevadas temperaturas, através da utilização de venturi ou ejector para recirculação;
- Ausência de partes móveis, no caso da utilização de um venturi ou ejector, para efectuar a recirculação; e
- Actua como sistema de ciclone com recirculação mecânica, no caso de falha do sistema electrostático (por ex., rotura do eléctrodo de descarga).

[089] **Exemplos práticos**

[090] Foi feito um protótipo à escala piloto para demonstrar a capacidade de recirculação electrostática do sistema através da utilização de um ventilador para a recirculação mecânica e de uma fonte de alta tensão para a recirculação electrostática.

[091] As figuras 7-8 mostram - em função do tamanho das partículas [diâmetro (Φ)] - as eficiências (η) obtidas, à escala piloto, no tocante ao ciclone simples (curva 0), ao sistema de recirculação mecânico (curva 1) e ao sistema de recirculação electrostático (curva 2), para duas situações extremas: muito baixa perda de carga no ciclone (400 Pa) - figura 7 - e perda de carga típica no ciclone (1 620 Pa) - figura 8.

[092] Tais figuras, respeitantes a ensaios onde a alimentação ao ciclone foi feita com partículas muito finas presentes em suspensão no ar ambiente (mediana 1,8 a 2,3 μm), mostram que a eficiência do sistema com recirculador electrostático (2) é sempre significati-vamente superior à do sistema com recirculador meramente mecânico, mas, sobretudo, para baixas perdas de carga no ciclone, isto é, para baixas velocidades, que correspondem a elevados tempos de residência. Por outras palavras, a recirculação

electrostática é sobretudo melhor do que a recirculação mecânica, nas situações em que os ciclones com sistemas de recirculação mecânica são menos eficazes.

[093] A figura 9 mostra os diâmetros de corte (d50), em função da velocidade (U) de entrada dos gases no ciclone, para três situações: o ciclone piloto isoladamente (curva 0; círculos); com recirculação mecânica (curva 1; circunferências) e com recirculação electrostática adicional (curva 2; quadrados).

[094] Nessa figura mostra-se a diferença nos diâmetros de corte do ciclone (diâmetro da partícula para o qual a eficiência do ciclone é de 50%), para as mesmas partículas, quando se aplica recirculação mecânica (1) ou recirculação electrostática (2). A recirculação electrostática é claramente mais vantajosa, apresentando os menores diâmetros de corte, para a mesma velocidade de entrada dos gases no ciclone.

[095] A figura 10 mostra o incremento médio na eficiência de captura ($\Delta\eta$) obtido pelo ciclone piloto, em função do tamanho das partículas [diâmetro (Φ)] , quando se aplica recirculação meramente mecânica (curva 1) ou recirculação electrostática (curva 2).

[096] Esta figura mostra o valor médio do aumento de eficiência de várias experiências realizadas até data, relativamente ao ciclone isolado. De novo, a recirculação electrostática (2) representa um aumento muito significativo na eficiência, relativamente à recirculação meramente mecânica (1). Experiências realizadas com poeiras industriais obtidas de caldeiras de queima de biomassa (estilha e serrim de madeira) confirmam os resultados obtidos com poeira ambiental.

[097] A figura 11 mostra a eficiência (η) da captura de partículas de fosfato dicálcico, com mediana em volume de

6,2 µm, com recirculação meramente mecânica (pontos 1; circunferências) e com recirculação electrostática (pontos 2; círculos), para várias velocidades (U) do fluxo.

[098] A figura 12 mostra a eficiência (η) da captura de partículas de rejeição de alto-forno de ferro/gusa, com mediana em volume de 7,5 µm, com recirculação meramente mecânica (pontos 1; circunferências) e com recirculação electrostática (pontos 2; círculos), para várias velocidades (U) do fluxo.

[099] A figura 13 mostra a eficiência (η) da captura de partículas de fosforite, com mediana em volume de 13,2 µm, com recirculação mecânica (pontos 1; circunferências) e com recirculação electrostática (pontos 2; círculos), para várias velocidades (U) do fluxo.

[100] Assim, verifica-se que o sistema proposto consegue reduzir significativamente as emissões, em comparação com ciclones de fluxo invertido ou outros sistemas de recirculação com concentrador a montante ou a jusante do colector. A utilização de geometrias de muito elevada eficiência para o colector (por exemplo, a geometria descrita na citada patente EP0972572) permite colocar o sistema proposto dentro da zona de elevadas eficiências características de equipamentos muito mais dispendiosos (lavadores húmidos, venturis, filtros de mangas e electrofiltros), mesmo no que diz respeito a partículas de dimensão inferior a ≈ 0,5μm, com a vantagem adicional de poder ser utilizado a muito elevada temperatura e para lavagem de gases ácidos por injecção de reagentes, designadamente em pó.

[101] Ora o desenvolvimento de sistemas de despoeiramento com eficiências significativamente superiores às dos ciclones ou de sistemas de ciclones de recirculação actualmente existentes, utilizando tecnologias

simples e económicas, sobretudo para partículas abaixo de 2-3μm, tem um elevado potencial para aplicação industrial. Várias indústrias (madeiras, metalomecânicas, cimenteiras, produção química de granulados e em pó, unidades de cogeração e caldeiras de queima de fuel e de biomassa) poderiam usufruir de equipamentos de baixo custo e com eficiência suficiente para colmatar a necessidade de recorrer a equipamentos muito mais dispendiosos, como filtros de mangas e electrofiltros. Igualmente, a indústria automóvel, na sua vertente de controlo de emissões por partículas resultantes da queima de combustível diesel, poderia usufruir de um simples equipamento tal como o proposto, utilizável a elevadas temperaturas e sem partes móveis.

[102] O sistema proposto também se pode utilizar, com grande vantagem, em vez dos reactores actualmente existentes para a lavagem de gases ácidos, nomeadamente HCl, HF, SO_2 e NO_x (óxidos de azoto), sendo possível projectar unidades extremamente compactas e com elevadas eficiências, quer na remoção dos gases, quer na taxa de utilização dos reagentes sólidos injectados como um pó, devido à recirculação electrostática de parte do reagente não utilizado.

[103] Finalmente, conforme resulta da figura 14, o dispositivo e o processo segundo a invenção são de tal modo eficientes na captura de partículas de pequeno tamanho que podem ser usados, por exemplo, na captura de bactérias do ar.

[104] Com efeito, a figura 14 mostra, muito esquematicamente, o resultado comparativo, relativamente à captura de bactérias do ar, baseado na contagem de colónias ao fim de dois dias (d=2) e de seis dias (d=6), entre um sistema com recirculação electrostática a 50 kV segundo a

invenção (2), um sistema apenas com recirculação mecânica (1) e um sistema apenas com um ciclone (0), por comparação com uma amostra de ar fresco à entrada do sistema. A contagem de bactérias é indicada pelo valor de *n* indicado na figura, onde *n* corresponde ao número de *cfu*, correspondendo *cfu* a uma unidade formadora de colónias

[105] Verifica-se que há uma eficiência de captura (de bactérias) de aproximadamente 90%, decorrente de:

- haver 8 colónias à entrada (ar fresco) ao fim de dois dias de cultivo e apenas uma à saída (com recirculação electrostática), dando η=87,5%, e
- haver mais de 50 colónias à entrada ao fim de 6 dias de cultivo e apenas 4 à saída, dando $\eta > 92\%$,

representando 90% o valor (aproximado) da respectiva média.

[106] Há ainda uma concretização da invenção que se não encontra representada nas figuras e que se caracteriza por, em paralelo com o ciclone concentrador (recirculador) de passo simples (Con) dotado dos ditos meios eléctricos de aplicação de alta tensão ionizante (AT), haver outro(s) ciclone(s) concentrador(es) (recirculador(es)) de passo simples dotado(s) com meios eléctricos de aplicação de alta tensão ionizante, definindo uma bateria de recirculadores, todos eles alimentados pelo mesmo ciclone colector (Col) – disposto a montante de tal bateria – e recirculando uma fracção do respectivo fluxo gasoso, com as poeiras concentradas, para tal ciclone colector. Fazendo descer, desse modo, a velocidade de circulação dos gases nos recirculadores, aumenta o efeito das forças eléctricas sobre as partículas no concentrador electrostático (vide figuras 11 a 13; círculos (2)).

[107] Uma outra concretização da invenção, que também

se não encontra representada nas figuras, caracteriza-se por, em série com o ciclone concentrador (recirculador) de passo simples (Con) dotado dos ditos meios eléctricos de aplicação de alta tensão ionizante (AT), haver outro(s) ciclone(s) concentrador(es) (recirculador(es)) de passo simples dotado(s) com meios eléctricos de aplicação de alta tensão ionizante, definindo uma bateria de recirculadores em série que são alimentados a partir de um mesmo ciclone colector (Col) – disposto a montante de tal bateria – e que recirculam uma fracção do respectivo fluxo gasoso, com as poeiras concentradas, para tal ciclone colector. Esta bateria de recirculadores em série aumenta o tempo de residência das partículas e o carregamento destas (vide figuras 11 a 13; círculos (2)).

[108] No presente pedido, o uso da expressão "cerca de" na especificação de valores limites de intervalos relativos à invenção, deve ser entendido como compreendendo a variação do valor do limite em causa em cerca de 10% do valor expresso para o mesmo, no sentido do alargamento do intervalo.

[109] Bibliografia

[110] Carminati, A., A. Lancia, D. Pellegrini e G. Volpiccelli, "Spray dryer absorption of HCl from flue gas", *Proc. 7th World Clean Air Congr.*, 426, 1986.

[111] A.M. Fonseca, J.M. Órfão e R.L. Salcedo, "*Dry scrubbing of HCl with solid lime in a cyclone reactor at low temperatures*", Ind. Eng. Chem. Res., 40, no.1, 304-313, 2001.

[112] Heap, B.M., "The continuing evolution and development of the dry scrubbing process for the treatment of incinerator flue gases", *Filtr. Sep.*, vol. 33, 375, 1996.

[113] Licht, W., "Air Pollution Control Engineering-

basic calculations for particulate collection", Marcel Dekker, New York and Basel, 1980.

[114] Lim, K.S., K.W. lee e M.R. Kuhlman, "An experimental study of the performance factors affecting particle collection efficiency of the electrocyclone", *Aerosol Science and Technology*, 35, 969-977, 2001.

[115] Lim, K.S., H.S. Kim e K.W. Lee, "Comparative performances of conventional cyclones and a double cyclone with and without an electric field", J. Aerosol Science, 35, 103-116, 2004.

[116] Mothes, H. e F. Loffler, "Prediction of particle removal in cyclone separators", *International Chemical Engineering*, vol. 28, 231-240, 1988.

[117] Oglesby, S. Jr. e G.B. Nichols, "Electrostatic Precipitation", Marcel Dekker, Inc., 1978.

[118] Parker, K.R., "Applied Electrostatic Precipitation", Blackie Academic & Professional, 1997.

[119] Salcedo, R.L.R., "Chemical separation in electrostatic precipitators", *Ph.D. Thesis*, McGill University, Montreal, Canada, 1981.

[120] Salcedo, R.L. e M.A. Coelho, "Turbulent Dispersion Coefficients in Cyclone Flow: an empirical approach", *Can. J. Chem. Eng.*, Agosto, 609-616, 1999.

[121] Salcedo, R.L. e M.J. Pinho, "Ciclones de muito elevada eficiência: da concepção à implementação industrial", *Ingenium*, 2ª série, nº 69, Setembro, 79-82, 2002.

[122] Salcedo, R.L. e M.J. Pinho, "Pilot and Industrial-Scale Experimental Investigation of Numerically Optimized Cyclones", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42, no.1, 145-154, 2003.

[123] Salcedo, R.L. e M. de Sousa Mendes, "Captura de poeiras finas com ciclones optimizados: estudo de dois

casos industriais", *Industria e Ambiente*, n° 30, 2° trimestre, 18–22, 2003.

[124] Salcedo, R.L.R., V. G. Chibante e I. Sôro, "Laboratory, pilot and industrial-scale validation of numerically optimized reverse-flow gas cyclones", *Trans. of the Filt. Soc*. 4(3), 220–225, 2004.

[125] Shrimpton, J.S. e R.I. Crane, "Small electrocyclone performance", *Chem. Eng. Technology*, 24(9), 951–955, 2001.

[126] White, H.J., "Industrial Electrostatic Precipitation", International Society for Electrostatic Precipitation, Addison-Wesley Publ. Co., 1963.

REIVINDICAÇÕES

1) Sistema de ciclones para despoeiramento e lavagem de gases – integrando um ciclone colector de fluxo invertido (Col) a montante de um ciclone concentrador de passo simples (Con), ciclones estes dispostos em série e com uma linha de recirculação, do concentrador (Con) para o coletor (Col), de parte do fluxo em processamento, tal ciclone concentrador de passo simples (Con) estando dotado de um canal central de exaustão de gases limpos (GL) e uma entrada que é tangencial à parede lateral de tal ciclone concentrador de passo simples (Con) o qual compreende meios elétricos de aplicação de alta tensão (AT) que formam um campo eléctrico ionizante que influencia as poeiras que percorrem o ciclone concentrado de passo simples (Con), afastando-as do dito canal central de exaustão – **caracterizado por** os ditos meios elétricos de aplicação de alta tensão (AT) serem constituídos por um elétrodo ou elétrodos de descarga disposto(s) segundo o eixo longitudinal do ciclone concentrador de passo simples (Con), e apenas dentro do ciclone concentrador de passo simples (Con), elétrodo(s) esse(s) isolado(s) eletricamente na zona de atravessamento da parede do recirculador, **por** tal parede estar eletricamente ligada à terra de modo a estabelecer-se uma elevada diferença de potencial entre a mesma e o(s) dito(s) elétrodo(s) de descarga, **e por** a tensão aplicada ao(s) elétrodo(s) de descarga, o diâmetro do(s) elétrodo(s) de descarga e a distância entre este(s) e a parede do ciclone concentrador de passo simples (Con) se combinarem de modo a originar uma densidade de corrente inferior a cerca de 0,1 mA/m^2 e um campo elétrico ionizado com um valor médio abaixo de cerca de $2x10^5$ V/m no ciclone concentrador de passo simples(Con).

2) Sistema de ciclones de acordo com a reivindicação 1,

caracterizado por a recirculação dos gases se fazer por meio de um ventilador, de um ejector ou de um venturi.

3) Sistema de ciclones de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por**, em paralelo com o ciclone concentrador de passo simples (Con) dotado dos ditos meios eléctricos de aplicação de alta tensão ionizante (AT), haver outro(s) ciclone(s) concentrador(es) de passo simples (Con) dotado(s) com meios elétricos de aplicação de alta tensão ionizante, definindo uma bateria de ciclones concentradores de passo simples (Con) em paralelo, todos eles alimentados pelo mesmo ciclone coletor de fluxo invertido (Col) – disposto a montante de tal bateria – e recirculando uma fração do respectivo fluxo gasoso, com as poeiras concentradas, para tal ciclone coletor de fluxo invertido (Col).

4) Processo de despoeiramento de um fluxo gasoso – em que, numa primeira etapa, se faz tal fluxo atravessar um ciclone coletor de fluxo invertido (Col), onde se captura parte das partículas (P) transportadas nesse fluxo, fazendo-o, numa segunda etapa, atravessar um ciclone concentrador de passo simples (Con), tal entrada sendo feita segundo uma direção tangencial à parede lateral do dito ciclone concentrador de passo simples (Con) e, numa terceira etapa, tal fluxo é dividido em dois fluxos distintos, o principal deles escapando do dito ciclone concentrador de passo simples (Con) através de um canal central de exaustão de gases limpos (GL), e o outro, onde parte das partículas que escaparam do ciclone coletor de fluxo invertido (Col) e permaneceram no fluxo que flui através do ciclone concentrador de passo simples (Con) são concentradas, é recirculado de novo para o dito ciclone coletor de fluxo invertido (Col) – **caracterizado por** as partículas no ciclone concentrador de passo simples (Con) serem afastadas

do canal central de exaustão por ação de uma combinação de forças mecânicas (de inércia) e elétricas, estas últimas decorrentes do atravessamento, por parte das ditas partículas dentro do ciclone concentrador de passo simples (Con), de um campo elétrico ionizante de alta tensão, estabelecido entre um elétrodo de descarga colocado de acordo com o eixo longitudinal do ciclone concentrador de passo simples (Con) e apenas dentro do ciclone concentrador de passo simples (Con), elétrodo eletricamente isolado da parede do ciclone concentrador de passo simples (Con), e tal parede, ligada à terra, **por** tal campo elétrico ionizado dentro do ciclone concentrador de passo simples (Con) ter um valor médio abaixo de cerca de $2x10^5$ V/m e gerar uma densidade de corrente do campo elétrico abaixo de cerca de 0,1 mA/m^2, a mencionada ação combinada provocando assim a concentração da maior parte das partículas remanescentes na ditar parte do fluxo que é recirculada para o ciclone coletor de fluxo invertido (Col), e por parte das partículas recirculadas ser capturada pelo ciclone coletor de fluxo invertido (Col).

5) Processo de acordo com a reivindicação 4, **caracterizado por** a fracção do fluxo gasoso recirculado do ciclone concentrador de passo simples (Con) para o ciclone coletor de fluxo invertido (Col) constituir cerca de 20 a 30% do total.

6) Processo de despoeiramento e lavagem de compostos gasosos, de um fluxo gasoso, conforme uma qualquer das reivindicações 4 ou 5, **caracterizado por**, a montante do ciclone coletor de fluxo invertido (Col) ou a montante de um ventilador, venturi ou ejector, se injectar um reagente para lavagem de gases.

7) Utilização **caracterizada pelo** emprego do dispositivo da reivindicação 1 e do processo da reivindicação 4 para

despoeiramento e lavagem de gases ácidos, designadamente de HCl (cloreto de hidrogénio), HF (fluoreto de hidrogénio), SO_2 (dióxido de enxofre) e/ou NO_x (óxidos de azoto).

8) Utilização **caracterizada pelo** emprego do dispositivo da reivindicação 1 e do processo da reivindicação 4 para despoeiramento de gases de queima de motores diesel.

9) Utilização **caracterizada pelo** emprego do dispositivo da reivindicação 1 e do processo da reivindicação 4 para captura de bactérias de um fluxo gasoso.

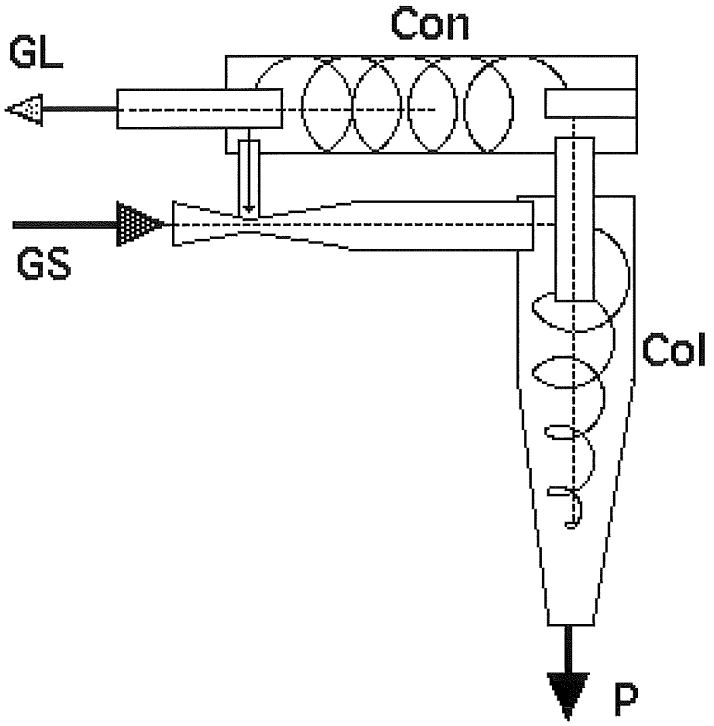

FIG. 1

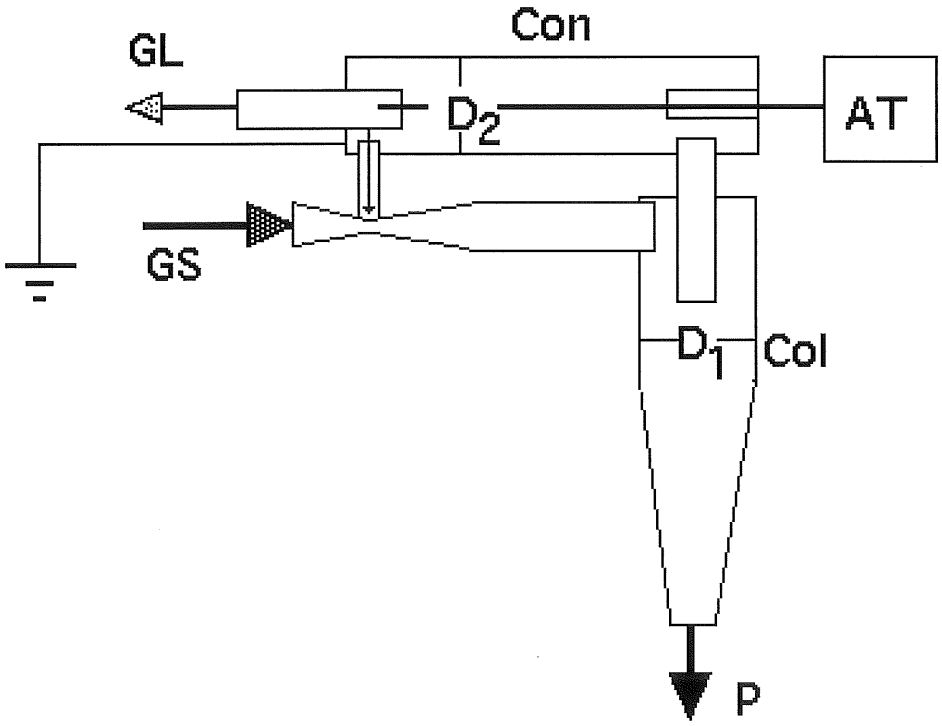

FIG. 2

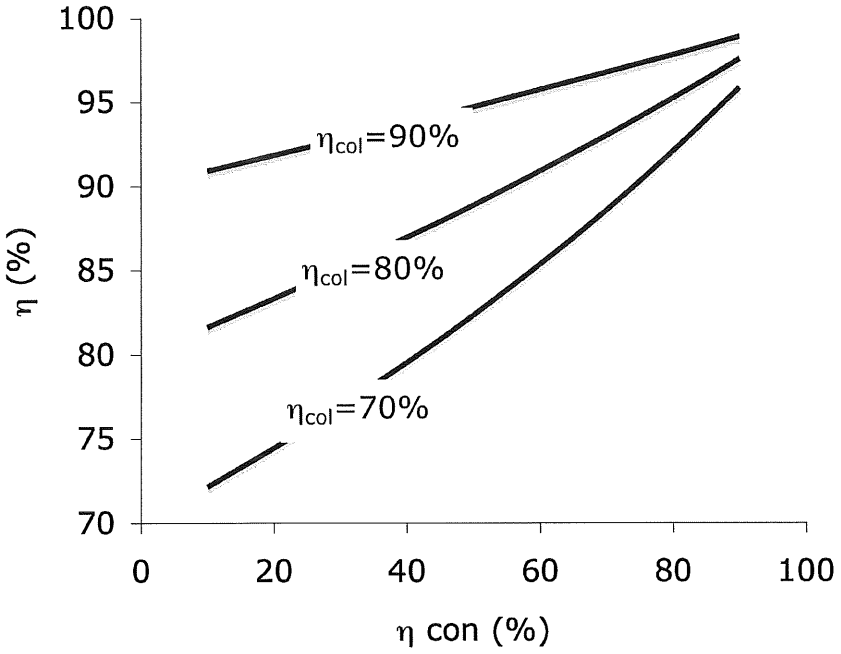
100
95
90
85
80
75
70
η (%)
ηcol=90%
ηcol=80%
ηcol=70%
0
20
40
60
80
100
η con (%)

FIG. 3

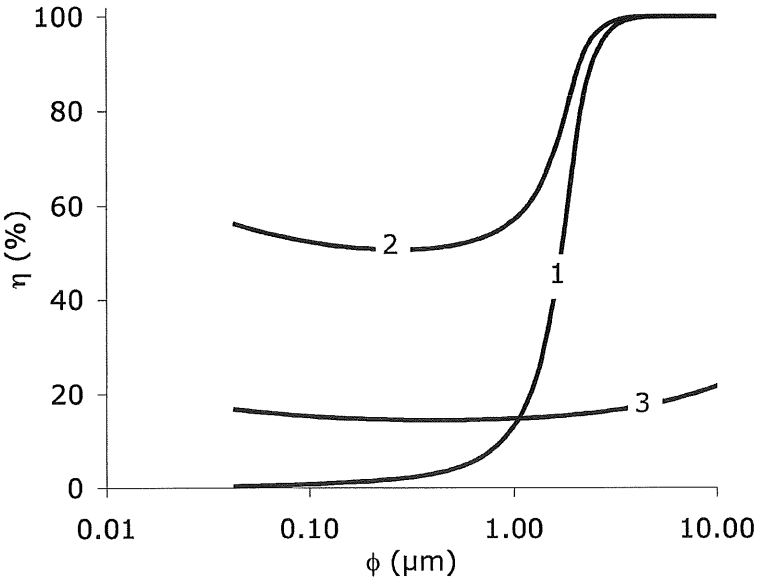
100
80
60
40
20
0
η (%)
2
1
3
0.01
0.10
1.00
10.00
ϕ (μm)

FIG. 4

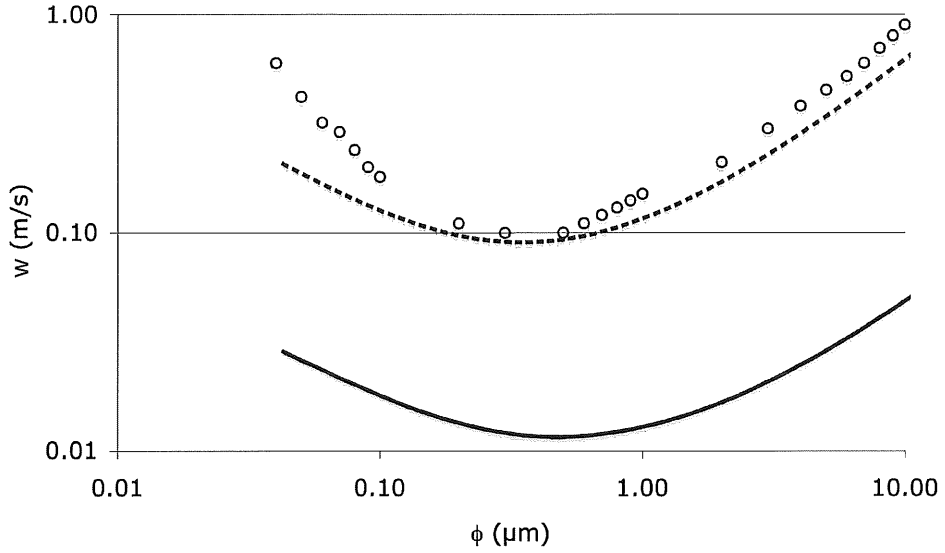
1.00
0.10
0.01
w (m/s)
0.01
0.10
1.00
10.00
ϕ (μm)

FIG. 5

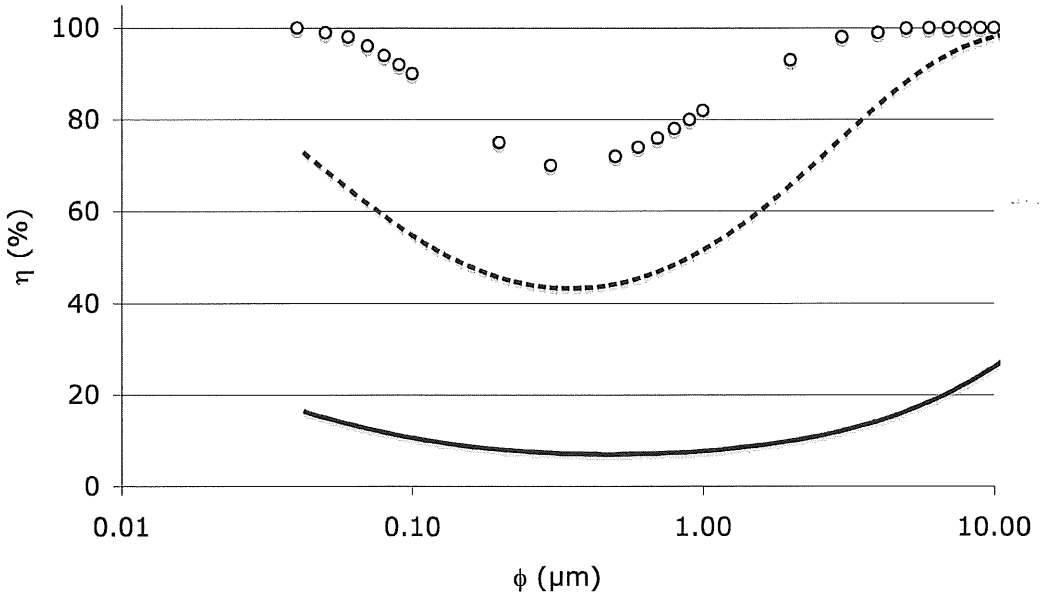
100
80
60
40
20
0
η (%)
0.01
0.10
1.00
10.00
ϕ (μm)

FIG. 6

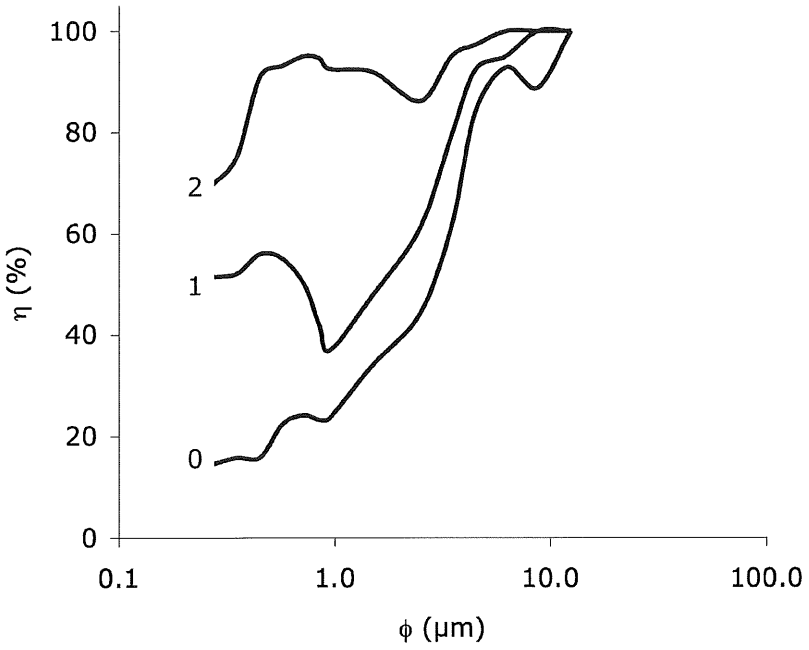
100
80
60
40
20
0
η (%)
2
1
0
0.1
1.0
10.0
100.0
ϕ (μm)

FIG. 7

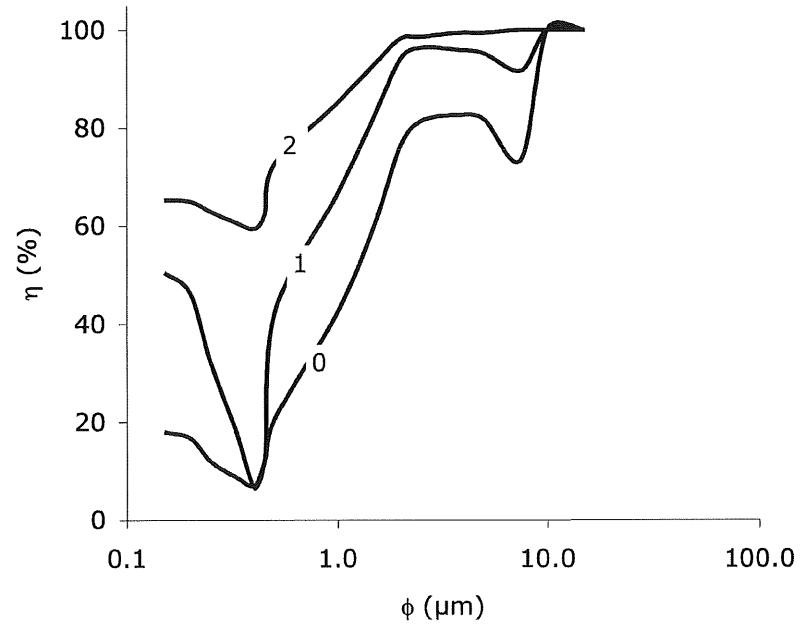
100
80
60
40
20
0
η (%)
2
1
0
0.1
1.0
10.0
100.0
ϕ (μm)

FIG. 8

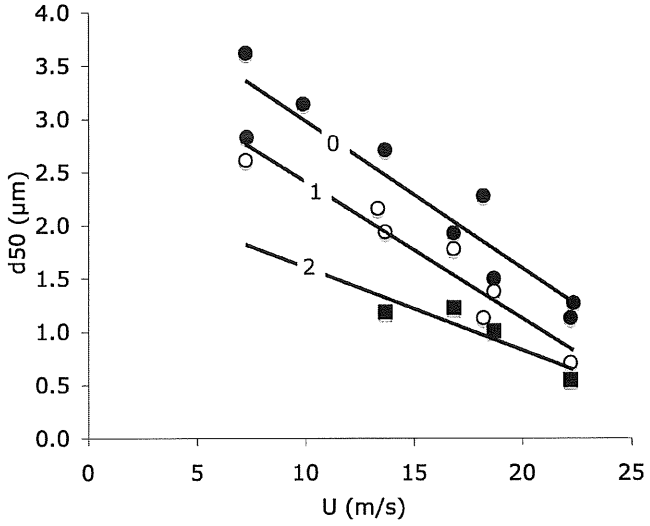
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
d50 (µm)
0
5
10
15
20
25
U (m/s)
0
1
2

FIG. 9

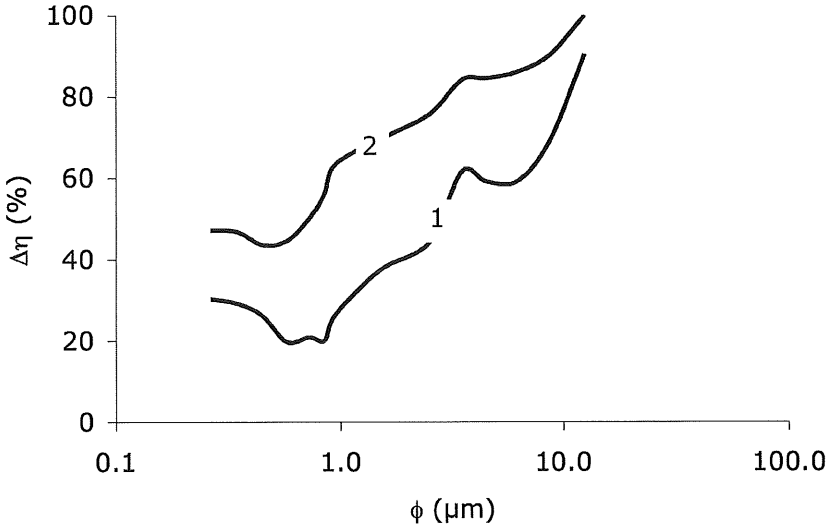
100
80
60
40
20
0
Δη (%)
0.1
1.0
10.0
100.0
ϕ (µm)
2
1

FIG. 10

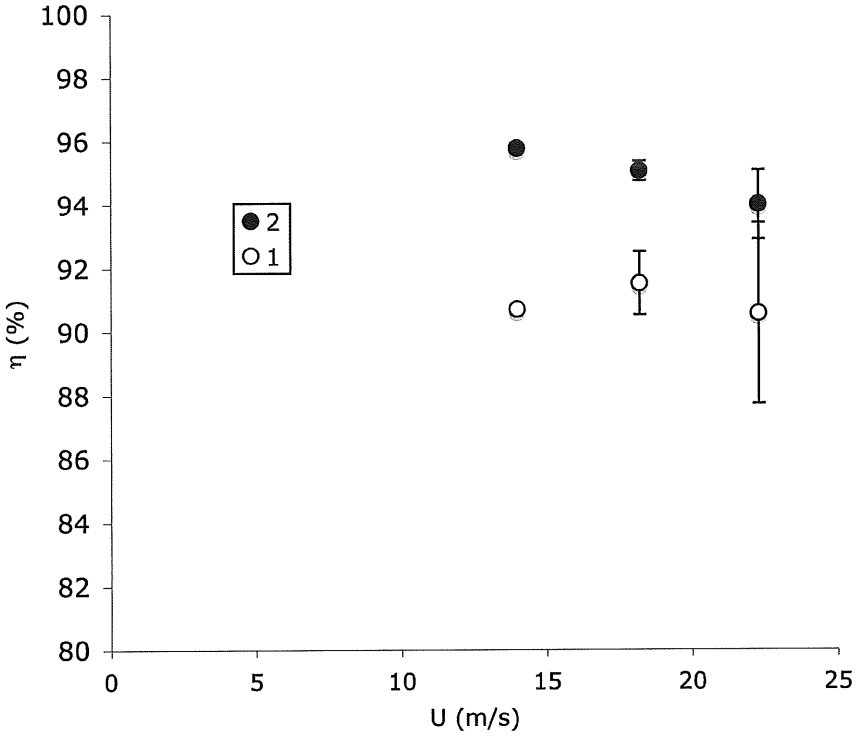

FIG. 11

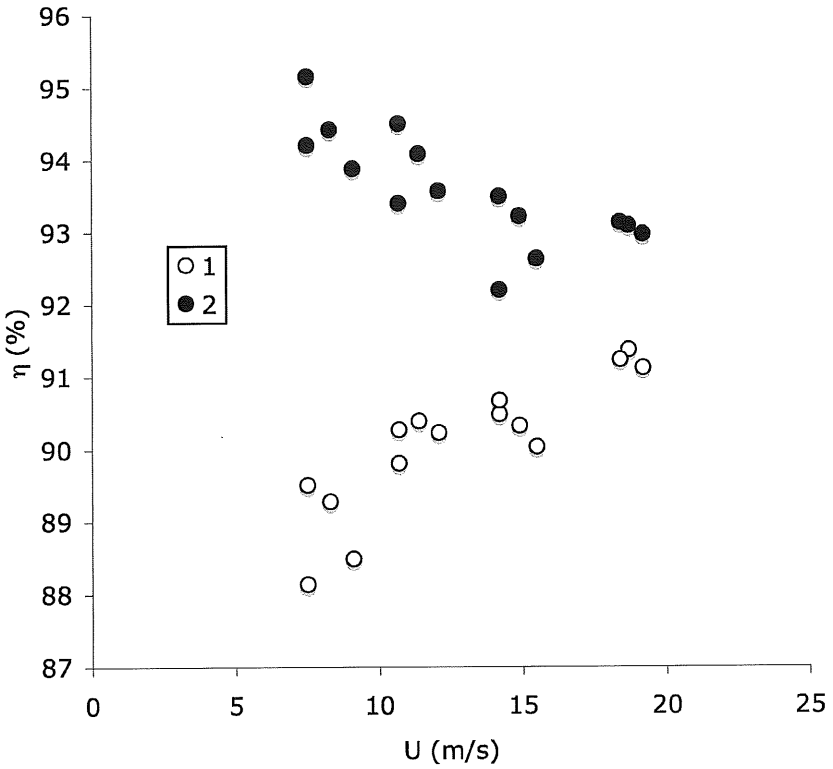

FIG. 12

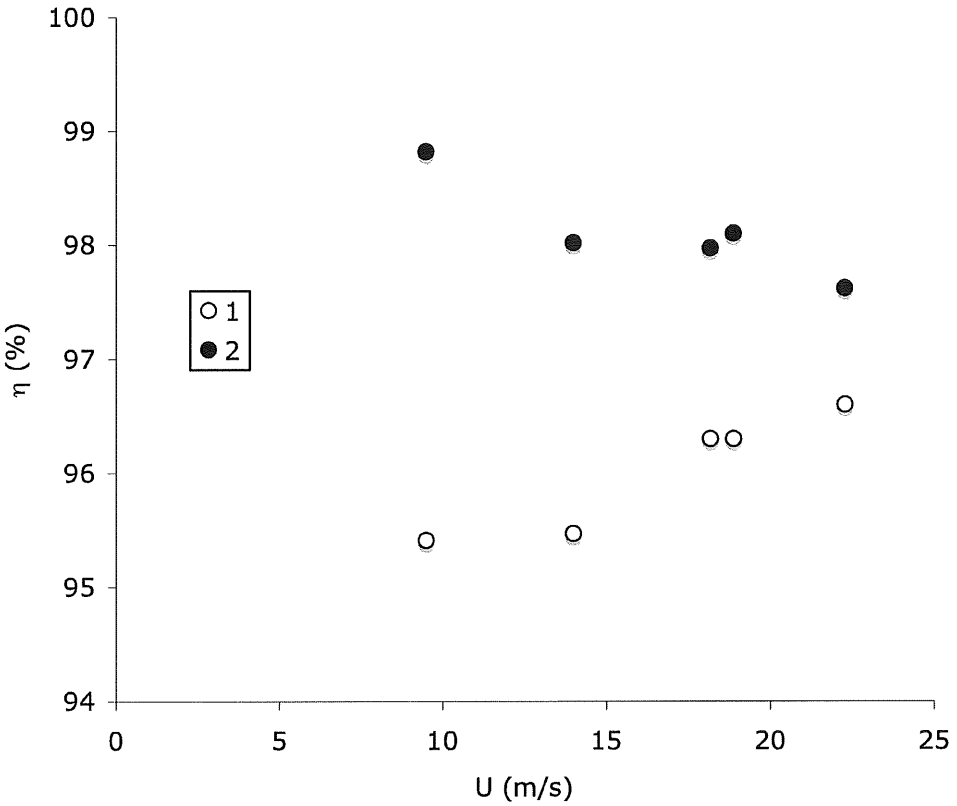

FIG. 13

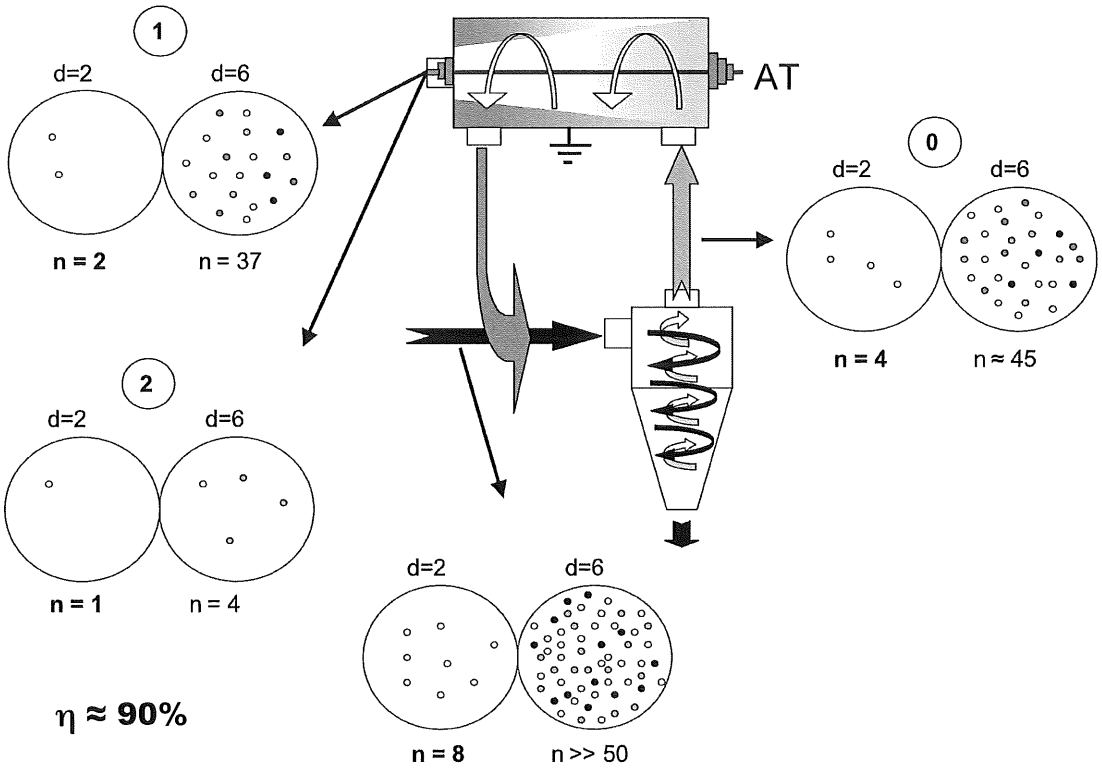

FIG. 14