



República Federativa do Brasil
Ministério do Desenvolvimento, Indústria
e do Comércio Exterior
Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

(21) **PI0709808-1 A2**



* B R P I 0 7 0 9 8 0 8 A 2 *

(22) Data de Depósito: 28/03/2007
(43) Data da Publicação: 26/07/2011
(RPI 2116)

(51) *Int.Cl.:*
F01N 1/02 2006.01

(54) Título: **SILENCIADOR PARA ATENUAR RUÍDO**

(30) Prioridade Unionista: 03/04/2006 US 11/395140

(73) Titular(es): Praxair Technology, INC.

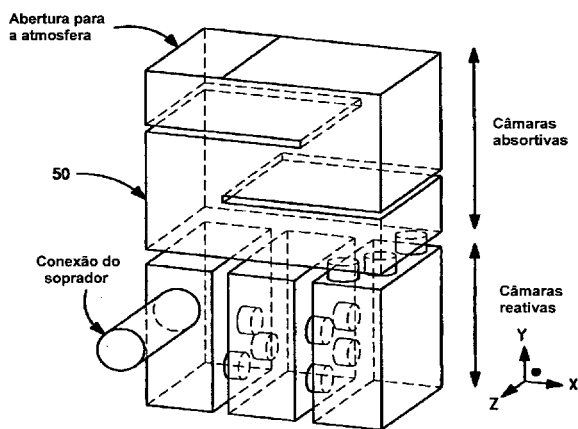
(72) Inventor(es): Cem E. Celik, James Smolarek, Michael Victor Barsottelli

(74) Procurador(es): Momsen, Leonardos & CIA.

(86) Pedido Internacional: PCT US2007007757 de 28/03/2007

(87) Publicação Internacional: WO WO2007/126945de
08/11/2007

(57) **Resumo:** SILENCIADOR PARA ATENUAR RUÍDO A presente invenção diz respeito no geral à atenuação de ruído de soprador a vácuo usando um silenciador. Mais particularmente, a presente invenção diz respeito a um silenciador barato, confiável e eficiente para reduzir os níveis de ruído em instalações de separação de gás baseada em adsorção proveniente da descarga do soprador a vácuo, ou da entrada do soprador de alimentação, para um nível de cerca de 90 dBA ou menos, na abertura do silenciador para a atmosfera. O silenciador inclui pelo menos uma câmara reativa (20, 30, 32) para atenuar pulsações de baixa frequência e pelo menos uma câmara absorbtiva (40, 42, 44) para atenuar ruído a média a alta frequência.



“SILENCIADOR PARA ATENUAR RUÍDO”

CAMPO DA INVENÇÃO

A presente invenção diz respeito no geral à atenuação de ruído de soprador usando um silenciador em um sistema de separação de gás baseado em adsorção. A presente invenção diz respeito, mais particularmente, a um silenciador barato, confiável e eficiente conectado na descarga de um soprador a vácuo ou na entrada de um soprador de alimentação de uma instalação de separação de gás baseada em adsorção. O silenciador pode reduzir os níveis de ruído um nível de cerca de 90 dBA ou menos na abertura do silenciador para a atmosfera.

FUNDAMENTOS DA INVENÇÃO

Instalações de separação de gás baseada em adsorção (por exemplo, sistemas de adsorção com oscilação de pressão (PSA) ou sistemas de adsorção com oscilação de vácuo (VPSA)) operam em várias capacidades. Houve e continua existir uma maior demanda de tais instalações para ter maior produtividade. Uma maneira de atingir esta meta é aumentar o tamanho da instalação, já que as tendências atuais dessas instalações de grande produção tornam-se comercialmente mais baratas.

Instalações VPSA de grande tonelagem exigem maior tamanho e/ou velocidade do soprador. O aumento nos tamanhos de soprador, entretanto, também aumenta o ruído irradiado e os níveis de pulsação na instalação. Tais pulsações podem levar a vibrações do tubo que podem finalmente danificar os tubos, leitos ou outro equipamento, tal como um refrigerador posterior na instalação. Além do mais, ruído gerado por essas pulsações pode ser perigoso para a segurança e saúde do pessoal da instalação e para o meio ambiente. Por exemplo, o nível de pressão sonora na saída de um soprador a vácuo de grande tamanho típico pode atingir níveis de até 170-180 dB. Por questão de segurança, preocupações ambientais e/ou regulatórias, entretanto, o nível de pressão sonora precisa ser reduzido a cerca de 90 dBA.

Para reduzir pulsação, e conseqüentemente o ruído dissipador pelo gás descarregado, instalações VPSA tipicamente empregam um silenciador na descarga do soprador a vácuo. O silenciamento de ruído atual em instalações BPSA padrões é provido por silenciadores tipo carcaça de aço cilíndrica comercialmente disponíveis. À medida que esses silenciadores tornam-se maiores, tanto no comprimento quanto no diâmetro para fornecer a atenuação sonora necessária para instalações maiores, eles tornam-se mais propensos a vibrar, agem como uma fonte de ruído e podem falhar mecanicamente. O custo para fabricação e manutenção de tais silenciadores, portanto, aumenta. Por causa de economia, confiabilidade e efetividade, silenciadores de carcaça de aço não são produzidos em escala industrial com sucesso para instalações de grande produção. Isto exige um método alternativo de silenciar o ruído do soprador em tais instalações.

As patentes U.S. 6.089.348 de Bokor e 4.162.940 de Clay et al. apresentam prática industrial típica para silenciar ruído de soprador. Em ambas essas patentes, é sugerido que o ruído do soprador pode ser reduzido ou dissipado por um silenciador cilíndrico tipo carcaça de aço que inclui múltiplas câmaras. Esses tipos de silenciadores tornam-se não efetivos para sopradores grandes que geram altos níveis de pulsações à medida que suas carcaças vibram por causa de pulsações do soprador. Além do mais, o custo de fabricação e manutenção de tais silenciadores é afetado adversamente pelo maior tamanho do soprador. Conseqüentemente, esses silenciadores não são aplicados economicamente em grande escala para grandes instalações.

A patente U.S. no. 5.957.664 de Stolz et al. sugere o uso de um amortecedor de pulsação tipo ressonador de Helmholtz no conduto de descarga do soprador logo antes do silenciador, de forma que a pulsação que entra no silenciador possa ser amortecida e, conseqüentemente, o desempenho do silenciador possa ser melhorado. Entretanto, uma abordagem como essa é limitada, dado que o desempenho de tais ressonadores somente é efetivo a

uma dada frequência para uma condição de desenho especificada. Em muitos casos, sopradores geram pulsos não somente em uma única frequência, mas também nos seus harmônicos.

5 A patente U.S. 6.451.0997 de Andreani et al. apresenta uma abordagem alternativa para a atenuação de ruído de soprador, revelando uma estrutura parcialmente enterrada. Esta estrutura tem tubos de impedância e defletores para fornecer atenuação de ruído.

10 Em vista da técnica anterior, seria assim desejável prover silenciadores mais confiáveis, baratos e com melhor desempenho para uso em instalações de separação de gás baseada em adsorção.

SUMÁRIO DA INVENÇÃO

15 A presente invenção diz respeito no geral à atenuação de ruído de soprador a vácuo usando um silenciador. Mais especificamente, a presente invenção diz respeito a um silenciador barato, confiável e eficiente para reduzir o nível de ruído (por exemplo, de cerca de 170-180 dB) na descarga do soprador a vácuo em instalações de separação de gás baseada em adsorção, tais como instalações de adsorção com alternância de pressão a vácuo (VPSA) à jusante para satisfazer critérios de segurança, ambientais e/ou regulatórios (por exemplo, para 90 dBA). Por exemplo, e embora não devendo ser

20 interpretado como limitação, espera-se que a presente invenção seja bem adequada para uso na descarga do soprador a vácuo de sistemas VPSA de oxigênio e dióxido de carbono.

25 O silenciador de acordo com a presente invenção pode também ser implementado na entrada de alimentação de instalações de separação de gás baseada em adsorção (por exemplo, instalações de adsorção com alternância de pressão (PSA) e/ou VPSA). Além do mais, o silenciador pode ser usado em outras aplicações, por exemplo, sistemas PSA para separação de ar que produzem oxigênio ou nitrogênio. Embora silenciadores de acordo com a presente invenção possam ser utilizados tanto em instalações de pequena

produção quanto instalações de grande produção, espera-se que os benefícios para redução de ruído sejam amplificados para instalações grandes.

Em relação a sistemas da técnica anterior, espera-se que a presente invenção facilite a fabricação. Além disso, são esperadas maiores atenuações de ruído com silenciadores produzidos de acordo com a presente invenção, posto que esses silenciadores incluem capacidade de silenciamento mais reativa e absorviva em relação aos silenciadores da técnica anterior.

Silenciadores de acordo com a presente invenção incluem tanto câmaras reativas para atenuar pulsações de baixa frequência quanto câmaras absorvivas para atenuar ruído de média a alta frequência. Na forma aqui usada, um silenciador é uma estrutura em comunicação fluídica com um soprador e em comunicação fluídica com a atmosfera. na forma aqui usada, uma câmara é um encerramento que tem pelo menos uma abertura de entrada e uma de saída. Paredes externas e internas do silenciador podem ser formadas de concreto. Ao contrário de silenciadores com carcaça de aço, silenciadores de acordo com a presente invenção são projetados para não agir como uma fonte de ruído. Ruído de baixa frequência é cancelado em pelo menos uma câmara reativa que tem pelo menos uma abertura que serve como uma entrada para o silenciador e pelo menos uma abertura que serve como uma saída. Se duas câmaras reativas forem posicionadas adjacentes uma à outra, então a saída de uma câmara reativa servirá como a entrada para a câmara reativa seguinte, e ficará localizada nas paredes divisórias entre tais câmaras. Pelo menos uma câmara absorviva é provida e é projetada para anular ruído a frequências maiores que as capacidades da câmara reativa. Pelo menos uma câmara absorviva tem pelo menos uma entrada e uma saída, e tem suas paredes interiores revestidas com pelo menos um material absorvente de som. A pelo menos uma câmara absorviva fornece um trajeto de fluxo que faz com que as ondas sonoras sejam incidentes no material absorvente de som, e o trajeto de fluxo é tipo serpentina.

Mais especificamente, um trajeto de fluxo em serpentina faz com que as ondas sonoras sejam incidentes na(s) superfície(s) absorvente(s) de som várias vezes e as ondas sonoras são absorvidas muito mais efetivamente em relação a passagens de fluxo retas. Em modalidades preferidas, paredes interiores das câmaras absorptivas são preferivelmente cobertas com material absorvente de som que efetivamente anula ruído em uma ampla faixa de frequências. Adicionalmente, as superfícies interiores da câmara reativa que estão em comunicação fluídica direta com uma câmara absorptiva podem também ser cobertas com material absorvente de som para prover tanto redução de ruído reativa quanto absorptiva.

Silenciadores da presente invenção incluem pelo menos uma e preferivelmente uma pluralidade de câmaras reativas. As câmaras reativas incluem pelo menos uma abertura nas paredes divisórias. Tais aberturas reduzem e/ou minimizam queda de pressão e facilitam a fabricação. Silenciamento reativo é provido no silenciador pela utilização de expansões e contrações nas áreas seccionais transversais do trajeto de fluxo de gás. Entretanto, em modalidades alternativas, pode haver somente uma abertura nas paredes divisórias. Embora possa ser possível incluir somente uma câmara reativa (por exemplo, em sopradores pequenos), modalidades preferidas de acordo com a presente invenção tipicamente incluirão uma série de câmaras reativas.

Silenciadores da presente invenção também incluem pelo menos uma câmara absorptiva. Em modalidades em que existe somente uma câmara absorptiva, a câmara reativa que está em comunicação fluídica direta com uma câmara absorptiva é preferivelmente coberta com material(s) absorvente(s) de maneira tal que ela possa também prover capacidades absorptivas. Configurações específicas das câmaras absorptivas preferivelmente fornecem um trajeto de fluxo em serpentina. Em modalidades preferidas da presente invenção, todas as paredes interiores das câmaras absorptivas são

cobertas com material(s) absorvente(s) de som. Espera-se que o silenciamento absoritivo seja mais efetivo nos silenciadores da presente invenção em relação aos da técnica anterior por causa da presença da grande área superficial interior coberta com material(s) absorvente(s) de som e o trajeto de fluxo em serpentina.

5
10
15
20
25

Conforme mencionado anteriormente e discutido a seguir, silenciadores da presente invenção reduzem e/ou eliminam os problemas de vibração de carcaça de aço característicos de muitos dos silenciadores da técnica anterior. Câmaras reativas de acordo com a presente invenção reduzem o nível de som irradiado refletindo as ondas sonoras para sua fonte. Para prover silenciamento reativo, o silenciador utiliza expansões e contrações nas áreas seccionais transversais do trajeto de fluxo de gás.

Silenciadores da presente invenção podem também ser mais fáceis de fabricar do que silenciadores de carcaça de aço ou um silenciador com muitas partes internas. Silenciadores com carcaça de aço algumas vezes apresentam falhas, tais como trincas e falhas da carcaça externa, paredes divisórias interiores e tubos de impedância por causa das pulsações de baixa frequência. A eliminação da construção da carcaça de aço de acordo com a presente invenção permite interiores de fácil construção e simples. Conseqüentemente, silenciadores da presente invenção podem ser fabricados completamente no local na instalação com um número mínimo ou reduzido de partes componentes. Silenciadores da presente invenção assim têm tanto as vantagens de simplicidade quanto maior desempenho na atenuação acústica. Silenciadores da presente invenção também apresentam a vantagem de menor queda de pressão no silenciador, o que pode ser uma consideração significativa para a eficiência geral da instalação.

Silenciadores da presente invenção dessa maneira proporcionam um importante benefício com a provisão de técnica habilitante para construir instalações de separação de ar baseada em adsorção em grande

escala, tais como, por exemplo, instalações VPSA de O₂. Além disso, espera-se que os custos de capital associados com silenciadores feitos de acordo com a presente invenção sejam menores do que de silenciadores de carcaça de aço típicos.

5 DESCRIÇÃO RESUMIDA DOS DESENHOS

Para um entendimento mais completo da presente invenção e de suas vantagens, deve-se fazer referência à descrição detalhada seguinte considerada em conjunto com os desenhos anexos, em que:

10 A figura 1 ilustra um sistema exemplar que incorpora um silenciador na descarga de um soprador a vácuo;

A figura 2 ilustra um silenciador de acordo com uma modalidade da presente invenção;

A figura 3 mostra um trajeto de fluxo de gás de acordo com o silenciador da figura 2 para uso com um soprador a vácuo;

15 A figura 4 mostra uma vista de posicionamento exemplar de aberturas nas câmaras reativas de acordo com uma modalidade adequada para uso de acordo com a presente invenção;

A figura 5 mostra um gráfico de perda de transmissão calculada teoricamente (dB) versus frequência (Hz) para as câmaras reativas;

20 A figura 6 mostra um gráfico de perda de transmissão calculada teoricamente (dB) versus bandas de frequência (Hz) para câmaras absorptivas; e

A figura 7 ilustra nível de pressão sonora medido experimentalmente (dB) versus tempo para uma unidade de teste de acordo com a presente invenção descrita a seguir.

DESCRIÇÃO DETALHADA

Conforme discutido anteriormente, a presente invenção diz respeito à atenuação de ruído de soprador a vácuo usando um silenciador. A presente invenção mais especificamente fornece um silenciador barato,

confiável e eficiente para reduzir os níveis de ruído para cerca de 90 dBA. Em modalidades exemplares da invenção, o silenciador pode ser empregado na descarga do soprador a vácuo em instalações VPSA de oxigênio de grande produção. O silenciador inclui câmaras reativas para atenuar pulsações de
5 baixa frequência e câmaras absorptivas para atenuar ruído de média a alta frequência.

Paredes externas e internas do silenciador podem ser feitas de concreto, incluindo concreto reforçado (por exemplo, concreto reforçado com aço). Entretanto, outros materiais de construção podem ser adequados para
10 uso de acordo com a invenção. Por exemplo, e embora não devendo ser interpretado como limitação, tijolo e/ou blocos de alvenaria podem ser usados. Além do mais, o material de construção pode ser diferente das câmaras reativa e absorptiva. Em uma modalidade preferida, as câmaras reativas podem ser formadas de concreto e as câmaras absorptivas podem ser
15 formadas de bloco de alvenaria. O(s) material(s) de construção para as câmaras reativa e absorptiva deve(m) facilitar a redução de ruído. Diferentes de silenciadores com carcaça de aço, silenciadores da presente invenção não agirão como uma fonte de ruído. Câmaras reativas reduzem o nível de som irradiado pela reflexão das ondas sonoras para sua fonte. Para prover
20 silenciamento reativo, o silenciador utiliza expansões e contrações nas áreas seccionais transversais do trajeto de fluxo de gás. A pelo menos uma câmara absorptiva fornece um trajeto de fluxo em serpentina, e todas as paredes interiores da(s) câmaras(s) absorptiva(s) são cobertas com material absorvente de som (por exemplo, fibra de vidro, lã de vidro, lã mineral, fibras de náilon
25 e/ou similares) para anular efetivamente ruído a altas frequências.

A figura 1 ilustra um sistema de adsorção de pressão a vácuo (VPSA) típico. Conforme mostrado na figura 1, a instalação VPSA 10 inclui um ou mais leitos absorventes (por exemplo, 12, 14) que alternam entre ciclos de adsorção e dessorção. Durante uma etapa de dessorção, o leito é conectado

a um soprador a vácuo 16, que faz com que o gás adsorvido desorva e seja descarregado como gás residual. Tais sopradores deslocam uma grande quantidade de gás da entrada para a saída por meio de suas bolsas entre seus lóbulos e o revestimento a um volume relativamente constante. O fluxo de gás para dentro e para fora dos sopradores desta maneira não é estacionário, mas, em vez disso, é uma ação discreta (ou intermitente). Por causa das diferenças de pressão entre as bolsas de gás e a tubulação de saída, cada vez que o rotor fica livre no alojamento, são criadas flutuações de pressão. Tais flutuações criam pulsação de gás e ruído. Essas pulsações são função do tamanho e velocidade do soprador, em que sopradores maiores e com maiores velocidades de rotação criam maiores pulsações e, conseqüentemente, maiores níveis de ruído.

Para reduzir a pulsação, e assim o ruído dissipado pelo gás descarregado, instalações VPSA empregam um silenciador 18 na descarga de um soprador a vácuo. O nível de pressão sonora na saída de um soprador a vácuo grande típico pode atingir níveis de até 170-180 dB. Entretanto, em virtude de preocupações de segurança e ambientais, esses níveis de ruído precisam ser reduzidos para níveis de aproximadamente 90 dB.

Além do mais, pode também ser desejável incluir um silenciador de entrada 20, conforme também mostrado, por exemplo, na figura 1. Silenciadores de acordo com a presente invenção podem também ser usados como silenciadores de entrada e posicionados à montante do soprador de alimentação 22 mostrado na figura 1. Quando o silenciador de acordo com a presente invenção é conectado na descarga do soprador a vácuo, gás proveniente do soprador a vácuo entra no silenciador através de uma câmara reativa e deixa o silenciador através de uma câmara absorviva. Quando o silenciador é conectado na admissão de um soprador de alimentação, gás da atmosfera entra no silenciador através de uma câmara absorviva e deixa o silenciador através da câmara reativa e para o soprador.

O tamanho geral de um silenciador depende de diversos fatores, incluindo a redução de ruído e vazão desejados de um gás particular. Redução de ruído depende basicamente do comprimento do silenciador, e a área do silenciador é determinada pela vazão de gás. À medida que a
5 instalação aumenta de tamanho, o fluxo médio através do silenciador também aumenta. Dessa maneira, a área do silenciador precisa ser aumentada para ter velocidade de fluxo aceitável no silenciador.

Conforme previamente mencionado, atenuação acústica nos silenciadores da presente invenção é obtida utilizando-se tanto seções reativas
10 quanto absorptivas. O(s) componente(s) reativo(s) basicamente fornece(m) redução de ruído de pico na faixa de baixa frequência (<250 Hz) e o(s) componente(s) absorptivo(s) fornece(s) redução de ruído nas faixas de frequência média (entre 250-500 Hz) e alta (>500 Hz).

Conforme também mencionado anteriormente, o tamanho e
15 velocidade do soprador ditam o tamanho do silenciador. Versados na técnica percebem assim que o silenciador de acordo com a presente invenção pode ser modificado para adaptar a tais critérios. Embora não devendo ser interpretada como limitante, uma modalidade exemplar inclui um silenciador projetado para um soprador a vácuo grande, por exemplo, um soprador a vácuo capaz
20 de operar a cerca de 35.000 scfm (56.270 Nm³/h) de fluxo de ar e que funciona a velocidades entre cerca de 1.400 rpm e 2.200 rpm. O soprador pode ter dois rotores tri-lóbulos e, conseqüentemente, a frequência primária das pulsações é seis vezes a velocidade da árvore. Em decorrência disto, o silenciador de concreto pode ser projetado para prover a melhora atenuação
25 de ruído para a faixa de frequência de 140 Hz a 220 Hz. Além do mais, existem harmônicos superiores dessas frequências no espectro de frequência das ondas sonoras, e o silenciador da presente invenção é também capaz de atenuar tal ruído de alta frequência.

Além do mais, os canais de fluxo em um silenciador como

esse podem ser projetados para acomodar confortavelmente o fluxo de 35.000 scfm (56.270 Nm³/h) de ar provido pelo soprador. Baixas velocidades de fluxo dentro do silenciador são importantes tanto para baixa queda de pressão quanto para impedir deterioração do material absorvente de som. Como um critério de projeto, a velocidade de fluxo na entrada do silenciador é preferivelmente mantida abaixo de 75 ft/s (22,86 m/s), embora a velocidade de fluxo média dentro do silenciador em qualquer seção seja mantida abaixo de 15 ft/s (4,57 m/s) para impedir deterioração dos materiais absorptivos (por exemplo, fibra de vidro) nas superfícies das câmaras absorptivas. Além do mais, o comprimento das aberturas entre as câmaras na seção de absorção é preferivelmente mantida em torno de um terço do comprimento da câmara para minimizar a queda de pressão nessas câmaras.

Conforme mencionado anteriormente, o silenciador pode ser modificado para se ajustar às variações em aplicações. Silenciadores de acordo com a presente invenção pode dessa forma ser projetados como uma estrutura com possibilidade adaptação a um maior tamanho e podem ser facilmente projetados para ser efetivos a outras velocidades do soprador (isto é, outras faixas de frequências efetivas) e vazões. Silenciadores que incorporam os recursos da presente invenção podem também ser projetados para uso na entrada de alimentação, conforme discutido anteriormente.

Por projeto, um silenciador de acordo com a presente invenção poderia ficar localizado bem na descarga do soprador a vácuo com mínima conexão de tubulação. Isto poderia ser particularmente vantajoso para impedir ressonância em conexões de tubulação do soprador até o silenciador. O comprimento de tal tubulação não deve ser igual ou próximo a um quarto do comprimento de onda dos pulsos. Desta maneira, pulsações na tubulação serão minimizadas. Para economizar espaço e prover isolamento acústico adicional, o silenciador e particularmente suas seções reativas podem ser colocados no subsolo. O silenciador pode estender-se tanto verticalmente

quanto horizontalmente.

Uma geometria ilustrativa e não limitante de um silenciador 50 para o soprador supramencionado está mostrada nas figuras 2-4. Uma área de fábrica exemplar para um soprador que tem as capacidades supramencionadas (isto é, operação a 35.000 scfm (56.270 Nm³/h) de vazão de ar e entre 1.400-2.200 rpm) deve ser cerca de 12' (3.658 mm) por 17' (5.182 mm) e 24' (7.315 mm) de altura com uma espessura de parede de cerca de 12" (304,8 mm).

À medida que o soprador descarrega gás residual, o fluxo pulsante entra no silenciador pela abertura de entrada 26 e expande-se na câmara reativa 28. Na modalidade mostrada, existem três câmaras reativas (28, 30, 32) na seção inferior do silenciador. Paredes divisórias (34, 36, 38) de cada uma dessas câmaras pode ter pelo menos uma abertura (por exemplo, múltiplas aberturas de 2' (610 mm) de diâmetro). Uma vista exemplar dessas paredes está mostrada na figura 4. Versados na técnica percebem que outros arranjos para a(s) abertura(s) nas paredes divisórias de tais câmaras podem ser projetados para uso de acordo com a presente invenção. A geometria das paredes divisórias provê expansão e contração nas áreas seccionais transversais do trajeto de fluxo de gás em uma série de câmaras discutida anteriormente. Assim procedendo, o ruído de baixa frequência e pulsações são atenuados. Além do mais, a área total da(s) abertura(s) da saída é projetada em cerca de 33 % maior que da entrada para minimizar queda de pressão. Por exemplo, e em uma modalidade ilustrativa, a câmara 30 tem três aberturas (por exemplo, aberturas de 2' (610 mm) de diâmetro) na parede divisória 34 no lado de entrada, ao passo que, na parede divisória 36 no lado de saída, existem quatro tais aberturas.

Conforme mostrado adicionalmente nas figuras 2-4, existem também múltiplas câmaras absorptivas (40, 42, 44) no silenciador 50. Cada câmara absorptiva (40, 42, 44) tem suas superfícies interiores revestidas com material(s) absorvente(s) de som (por exemplo, fibra de vidro). Tal

revestimento é suficientemente espesso (por exemplo, 2 polegadas (50,8 milímetros) de espessura em algumas modalidades) a fim de facilitar a redução de ruído na faixa de média e alta frequência (>250 Hz). Nessas câmaras, ruído de alta frequência é basicamente atenuado pela absorção acústica. O tamanho dessas câmaras é projetado para prover baixas velocidades de fluxo do gás de forma que ele não deteriore o(s) material(s) absorvente(s) e leve a menor queda de pressão.

Gás residual é descarregado na atmosfera pela abertura 46 no topo do silenciador. Se o silenciador for projetado como uma unidade subterrânea, ou uma unidade parcialmente subterrânea, então a abertura de saída 46 precisa estender-se bem acima do nível do terreno de maneira a não causar asfixia de nitrogênio. Para os projetos acima do terreno, uma cobertura de chuva nesta saída deve ser o bastante para a maioria das aplicações.

No silenciador para o soprador supramencionado, existem três câmaras reativas em série. Independente do número de câmaras, câmaras reativas reduzem o nível de som irradiado, refletindo as ondas acústicas para sua fonte. Para prover silenciamento reativo, o silenciador utiliza expansão e contração nas áreas seccionais transversais do trajeto de fluxo de gás. Câmaras reativas são basicamente efetivas para atenuar ruído de baixa frequência (150-250 Hz).

Como é bem conhecido pela teoria de silencioso unidirecional, a magnitude da perda de transmissão em uma única câmara reativa é determinada pelo tamanho da entrada, saída e áreas da câmara, ao passo que o comprimento da câmara determina a faixa de frequência efetiva do silenciador. Por este motivo, a seleção do comprimento da câmara é muito importante para silenciamento efetivo. Se o comprimento da câmara for igual a múltiplos de um quarto do comprimento de onda ($L = \lambda/4, 3 \lambda/4, 5 \lambda/4...$), a perda de transmissão será máxima. Por outro lado, se o comprimento da câmara for igual a múltiplos de meio do comprimento de onda ($L = \lambda/2, \lambda, 3$

$\lambda/2, \dots$), a perda de transmissão será zero.

Com esta teoria em mente, cada uma dessas câmaras reativas é projetada para prover o nível desejado de perda de transmissão na faixa de frequência de interesse. A perda de transmissão total provida pelas diversas câmaras reativas (por exemplo, três) é a soma de cada uma das inúmeras (por exemplo, três) perdas por transmissão). Perda de transmissão teórica calculada (atenuação acústica) em função da frequência das ondas sonoras para cada uma das três câmaras para a modalidade supradescrita e sua soma estão mostradas na figura 5. As câmaras reativas são projetadas para prover perda de transmissão de aproximadamente 40-50 dB na faixa de frequência de interesse de 150-250 Hz.

Câmaras absorptivas atenuam o som, convertendo a energia acústica em calor pelo atrito nos vazios entre as partículas de gás oscilantes e material absorvente de som fibroso/poroso. Silenciadores absorptivos são efetivos na atenuação de ruído de média e alta frequência.

No silenciador exemplar supradiscutido, atenuação acústica pela absorção ocorre nas três câmaras de pressão superiores. Superfícies internas dessas câmaras são revestidas com material absorptivo (por exemplo, fibra de vidro de 2" (50,8 mm) de espessura). Na unidade de teste descrita no exemplo seguinte, somente painéis de fibra de vidro nus são instalados, uma vez que a unidade será usada por períodos de tempo relativamente curtos. Materiais absorventes tais como superfícies de fibra de vidro, entretanto, podem ser cobertos com folhas perfuradas (por exemplo, placas finas de metal perfuradas) para prover proteção adicional do(s) material(s) absorvente(s) contra danos superficiais. Tais perfurações podem ser preferivelmente na faixa de 25-50 % da área aberta.

Conforme mencionado anteriormente, materiais comercialmente disponíveis sem ser fibra de vidro podem também ser empregados com um material absorvente de som. Um critério importante

quando se usa fibra de vidro ou material tipo fibra de vidro é que o material deve suportar velocidades de fluxo de até cerca de 40 pés/s (12 m/s). Adicionalmente, suas propriedades de absorção acústica não devem se deteriorar a elevadas temperaturas de até cerca de 300°F (149°C). Materiais sem ser fibra de vidro, tais como lã mineral, fibras de náilon ou similares, podem também ser usados como material absorvente de som nas câmaras absorptivas, desde que as propriedades de absorção acústica do material não deteriorem a temperatura na saída do soprador (por exemplo, cerca de 300°F (149°C)) e com altas velocidades superficiais. Combinações de tais materiais podem ser similarmente usadas. Em algumas modalidades específicas, câmaras absorptivas são projetadas para prover coletivamente cerca de 50 dB de atenuação acústica. De maneira mais geral, entretanto, a geometria da câmara e o coeficiente de atenuação acústica do material absorptivo determinam a atenuação total (perda de transmissão) provida pela(s) câmara(s) absorptiva(s). A perda de transmissão calculada esperada para cada banda de oitava para o caso de uma, duas e três câmaras está mostrada na figura 6. Conforme ilustrado na figura 6, as câmaras absorptivas são mais efetivas a freqüências mais altas do que freqüências mais baixas (por exemplo, uma seção absorptiva de três câmaras pode prover 25-30 dB de atenuação acústica na faixa de freqüência de interesse de 140-220 Hz, oposto a próximo de 50 dB para freqüência mais alta). Praticamente, entretanto, a atenuação total provavelmente será mais alta, uma vez que as ondas sonoras que chegam não são ruídos de baixa freqüência puros, mas também têm ruído de freqüência mais alta por causa de outros harmônicos.

Um outro fator importante a considerar no projeto de um silenciador é a quantidade de queda de pressão (ou contrapressão) induzida pelo silenciador na saída do soprador. Menor queda de pressão pode ser desejável para maior eficiência geral da instalação. Tanto simulações computacionais quanto resultados experimentais sugerem que o silenciador

exemplar projetado com três câmaras reativas em série com três câmaras de pressão absorptivos dá cerca de 0,15 psi (1,03 kPa) de queda de pressão nas condições de pico de fluxo. Conforme esperado, a maior parte da queda de pressão ocorre nas câmaras reativas por causa de múltiplas expansões e contrações do fluxo. Isto é muito menos que a queda de pressão de alguns silenciadores tipo carcaça de aço típicos. Em virtude de as instalações não funcionarem continuamente em vazões de pico, a queda de pressão média esperada é menor, e, em alguns casos, muito menor.

A unidade pode ser construída como uma estrutura que estende-se verticalmente. O silenciador pode também ser construído com uma estrutura que estende-se horizontalmente, ou uma combinação de estruturas que estendem-se verticalmente e horizontalmente. Com extensão vertical, uma pluralidade de seções pode ser construída em uma área de fábrica muito limitada. Isto pode ser vantajoso quando o espaço é limitado. Alternativamente, uma estrutura que estende-se horizontalmente pode ser colocada sob o terreno para economizar espaço. Adicionalmente, uma unidade subterrânea proverá a vantagem de isolamento acústico adicional pelo terreno. O silenciador pode também ser projetado como uma unidade parcialmente subterrânea, por exemplo, com câmaras reativas sendo colocadas subterrâneas, uma vez que basicamente pulsações de baixa frequência são nessas câmaras. Vários diferentes arranjos podem ser feitos, dependendo do espaço disponível na área da instalação. Em alguns lugares, o espaço da instalação poderia ser muito limitado, ao passo que, em outros, tais limitações podem não existir.

Conforme apresentado a seguir, as paredes que dividem as câmaras nas seções reativas da unidade de teste têm múltiplas aberturas circulares de 2 pés (609,6 milímetros) de diâmetro. Entretanto, a forma dessas aberturas pode ser retangular ou qualquer outra forma, desde que a área total da(s) abertura(s) de saída de uma câmara seja cerca de 33 % mais que a(s)

aberturas(s) de entrada (considerando-se a queda de pressão). Com propósitos de ilustração, pode haver mais que três furos na parede divisória 34, ou mais que quatro furos na segunda 36 e terceira 38 paredes divisórias. Se o número de furos for aumentado, então o tamanho dos furos deve ser diminuído correspondentemente para manter aproximadamente a mesma área aberta total nas paredes.

A geometria atual das câmaras de silenciamento fornece anulamento de som necessário nas câmaras reativas. Além do mais, tubos de impedância podem ser colocados nas aberturas para melhorar a perda de transmissão na faixa de frequência de interesse. Os comprimentos relativos dos tubos e câmaras juntamente com o comprimento de onda as ondas sonoras determinam a melhoria na atenuação acústica. O comprimento do(s) tubo(s) em cada câmara deve, preferivelmente se a metade do comprimento da câmara para prover máxima atenuação. Perfurações na superfície dos tubos podem aumentar ainda mais a atenuação de ruído.

A espessura das paredes de concreto na unidade de teste descrita a seguir é 12" (304,8 mm). Esta espessura se deve parcialmente à provisão de suporte estrutural para o silenciador que estende-se verticalmente. No caso de uma unidade que estende-se horizontalmente ou que é subterrânea, a espessura de parede pode ser menor 6" a 8" (152,4 a 203,2 mm) de espessura, comparada com 12" (304,8 mm) de espessura.

No exemplo seguinte, a unidade incluiu três câmaras reativas e três câmaras absortivas. O número de câmaras pode ser reduzido ou aumentado para prover a atenuação de ruído necessária. Alternativamente, algumas dessas câmaras podem ser projetadas para prover tanto atenuação de ruído reativa quanto absortiva. Por exemplo, superfícies interiores dos últimos estágios de câmaras reativas próximas às câmaras absortivas podem ser cobertas com material absorvente de som para melhorar a atenuação de ruído nessas câmaras. Tal câmara reativa deve preferivelmente ser a câmara reativa que está em comunicação fluidica direta com a câmara absortiva, uma vez que

o nível de pulsações deve ser substancialmente diminuído de maneira a não danificar o material absorvente ou sua instalação, Dessa maneira, tais câmaras podem prover tanto atenuação acústica reativa quanto absorativa.

5 Tamanhos particulares das câmaras e silenciador no exemplo seguinte são especificamente projetados para um grande silenciador que, em condições operacionais normais, provê 35.000 scfm (56.270 Nm³/h). Para tamanhos de sopradores maiores ou menores, o silenciador pode ser projetado simplesmente conservando a razão de vazões volumétricas em todas as seções de fluxo. Ou seja, por exemplo, o uso de um soprador que fornece 25 % mais
10 de saída leva a um aumento de 25 % na área de fluxo.

Para aumentar o silenciamento absorativo, painéis de parede vertical e horizontal interiores podem ser colocados dentro das câmaras absorativas, conforme discutido anteriormente. Tais paredes dividem as áreas de fluxo em duas, três, quatro ou qualquer número de seções, e ambos os
15 lados dessas paredes divisórias podem ser cobertos com material(s) absorvente(s) de som para prover atenuação de ruído adicional.

Exemplo

Para validar estimativas analíticas, um estudo experimental foi realizado construindo uma unidade de teste do silenciador de concreto com o
20 tamanho e geometria supramencionados. Mais especificamente, o silenciador incluiu três câmaras reativas e três câmaras absorativas revestidas com fibra de vidro de 2" (50,8 mm) de espessura, conforme mostrado nas figuras 2-4. O silenciador foi projetado para operação com um soprador capaz de operar a 35.000 scfm (56.270 Nm³/h) de fluxo de ar a 1.400-2.200 rpm.

25 Sensores de pulsação de pressão foram colocados em cada câmara para medir o nível de pressão sonora e assim a efetividade de cada câmara. As medições foram realizadas para várias velocidades de rotação do rotor com diferentes condições de vácuo do soprador.

A figura 7 mostra os resultados de teste do nível de pressão

sonora para a saída do soprador e saída de cada câmara no silenciador para velocidades do soprador de 1.800, 2.000 e 2.200 rpm, e a entrada do soprador sendo operada a pressões de 1, 3, 5 e 7 psi (6,89, 20,68, 34,47 e 48,26 kPa) (enquanto a velocidade era fixada em 1.800 rpm, a válvula foi ajustada para 1 psi (6,89 kPa), os dados registrados e em seguida a válvula comutada para 3 psi (20,68 kPa), dados registrados, e o mesmo para 5 psi (34,47 kPa) e 7 psi (48,26 kPa)). A comparação dos níveis de pressão sonora medidos entre a saída do soprador (primeiro a partir de cima) e a saída da câmara 3 (quarta a partir de cima) fornece a eficiência das três câmaras reativas em combinação.

Conforme projetado, as câmaras reativas coletivamente fornecem a grosso modo 40-50 dB de atenuação de ruído. Similarmente, a comparação dos níveis de pressão sonora entre as saídas da câmara 3 (quarta a partir de cima) e a câmara 6 (a última câmara) apresenta a eficiência coletiva das três câmaras absorventes. Os resultados medidos sugerem grosseiramente 20-25 dB de atenuação sonora pelas câmaras absorventes. É também importante notar que o nível da pressão sonora medido na saída do silenciador é influenciada pelo ruído do soprador e motor, por exemplo, medições dentro da última câmara do silenciador sugerem aproximadamente mais de 10 dB de atenuação de ruído pelas câmaras de absorção em relação a alguns pés fora da saída do silenciador. A unidade de teste ficou localizada internamente. Conseqüentemente, os resultados do teste podem ser impactados em relação a uma unidade externa. Ambos os resultados medidos para as câmaras reativa e absorativa, entretanto, concordam bem com as estimativas analíticas.

Versados na técnica devem perceber que as modalidades específicas aqui reveladas podem ser facilmente utilizadas como uma base para modificar ou projetar outras estruturas para realizar os mesmos propósitos da presente invenção. Versados na técnica devem também perceber que tais construções equivalentes não fogem do espírito e escopo da invenção apresentada nas reivindicações anexas.

REIVINDICAÇÕES

1. Silenciador para atenuar ruído, caracterizado pelo fato de que compreende:

5 pelo menos uma câmara reativa, a pelo menos uma câmara reativa separada de uma outra câmara por uma parede divisória, cada parede divisória incluindo pelo menos uma abertura nela; e

pelo menos uma câmara absorviva tendo uma parede divisória, em que a pelo menos uma câmara absorviva fornece um trajeto em serpentina através da pelo menos uma câmara absorviva.

10 2. Silenciador de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o silenciador é formado de concreto.

3. Silenciador de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de que as paredes interiores da pelo menos uma câmara absorviva são cobertas com pelo menos um material absorvente de som.

15 4. Silenciador de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que a pelo menos uma câmara absorviva coberta absorve e reduz ruído a frequências acima de 250 Hz.

20 5. Silenciador de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que o pelo menos um material absorvente é selecionado do grupo que compreende: fibra de vidro, lã de vidro, lã mineral e fibras de náilon.

6. Silenciador de acordo com a reivindicação 5, caracterizado pelo fato de que o pelo menos um material absorvente compreende fibra de vidro.

25 7. Silenciador de acordo com a reivindicação 6, caracterizado pelo fato de que a pelo menos uma câmara absorviva coberta inclui adicionalmente uma placa metálica perfurada disposta em uma superfície do pelo menos um material absorvente.

8. Silenciador de acordo com a reivindicação 7, caracterizado pelo fato de que a placa metálica perfurada contém cerca de 25-50 % de área

aberta.

9. Silenciador de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o silenciador reduz os níveis de ruído para 90 dBA ou menos.

5 10. Silenciador de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o silenciador atenua ruído proveniente de um soprador.

11. Silenciador de acordo com a reivindicação 10, caracterizado pelo fato de que o soprador a vácuo é um componente de um sistema de separação de gás baseado em adsorção.

10 12. Silenciador de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a pelo menos uma abertura da pelo menos uma câmara reativa contém um tubo de impedância na pelo menos uma abertura da pelo menos uma câmara reativa.

15 13. Silenciador de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o número de câmaras reativas é três, e o número de câmaras absorptivas é três.

14. Silenciador de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o número de câmaras reativas é cinco, e o número de câmaras absorptivas é dois.

20 15. Silenciador de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a pelo menos uma câmara reativa é formada de um material selecionado do grupo que compreende: concreto, tijolo e bloco de alvenaria.

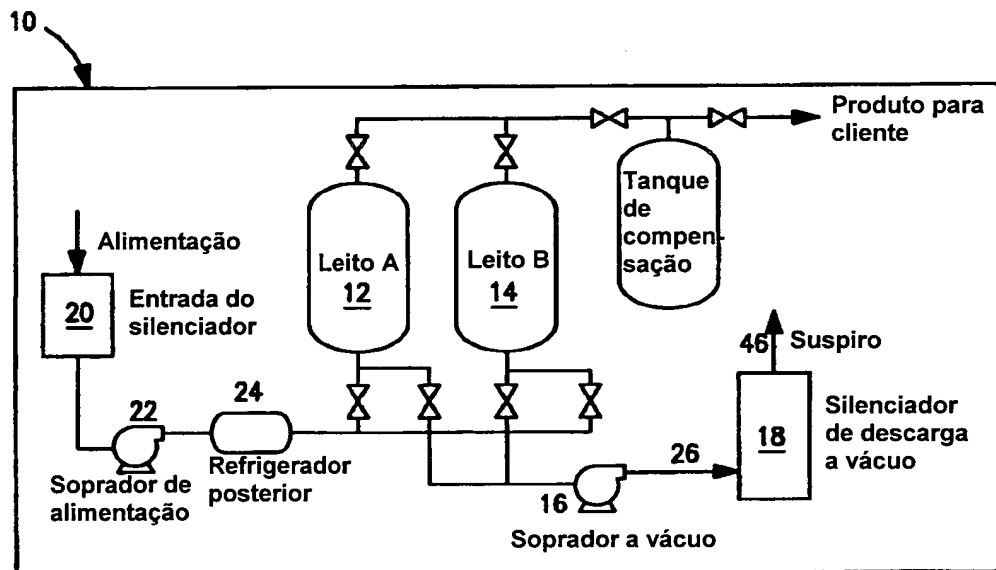


FIG. 1

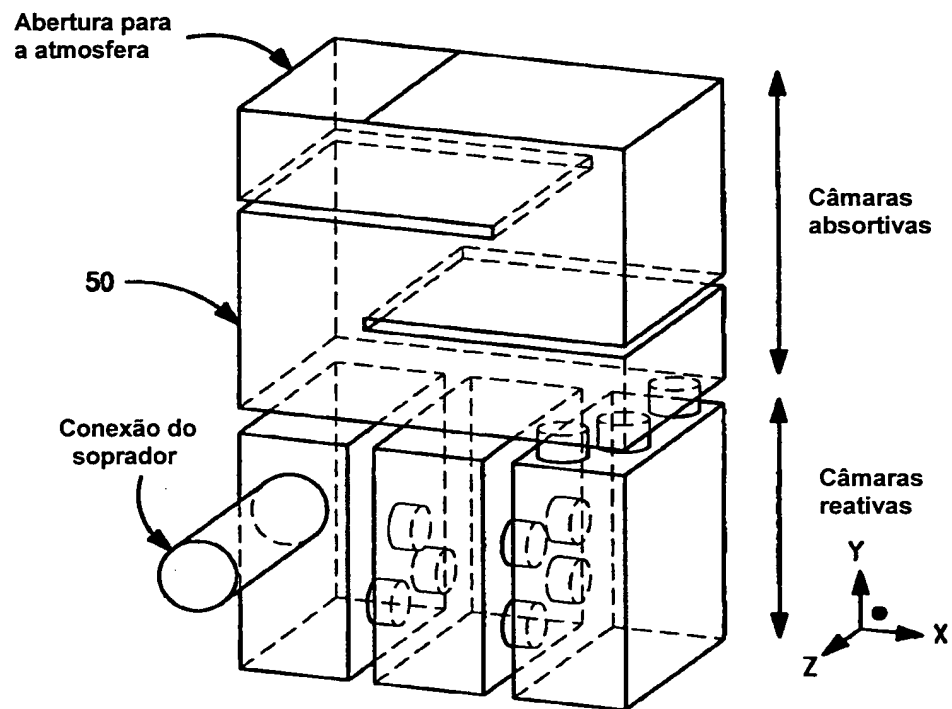


FIG. 2

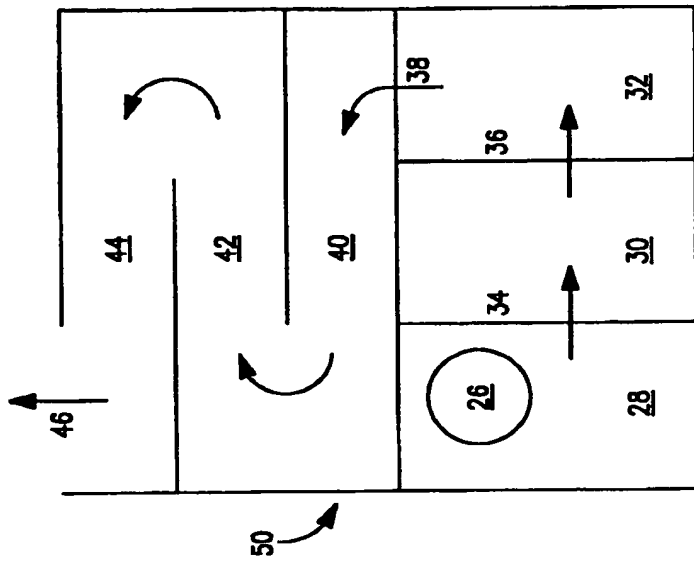


FIG. 3

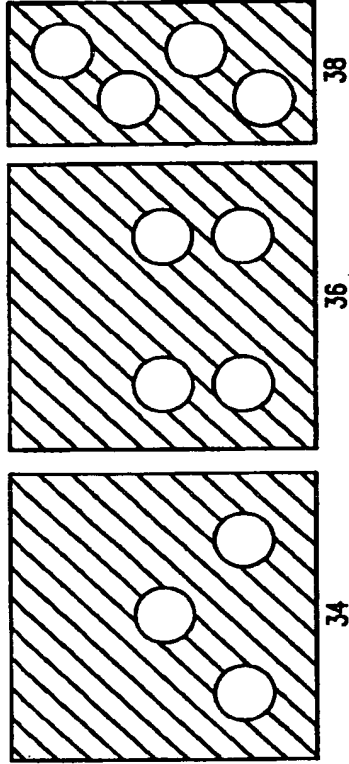


FIG. 4

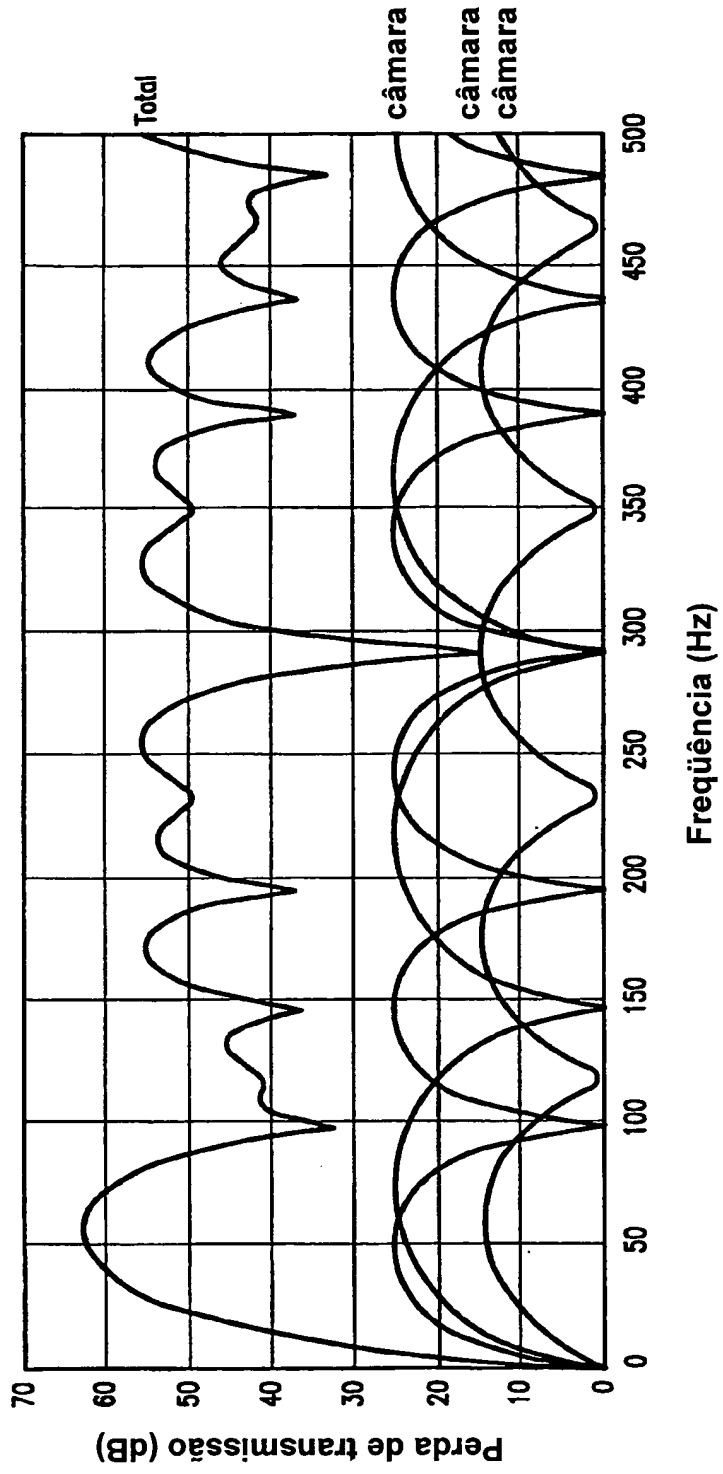


FIG. 5

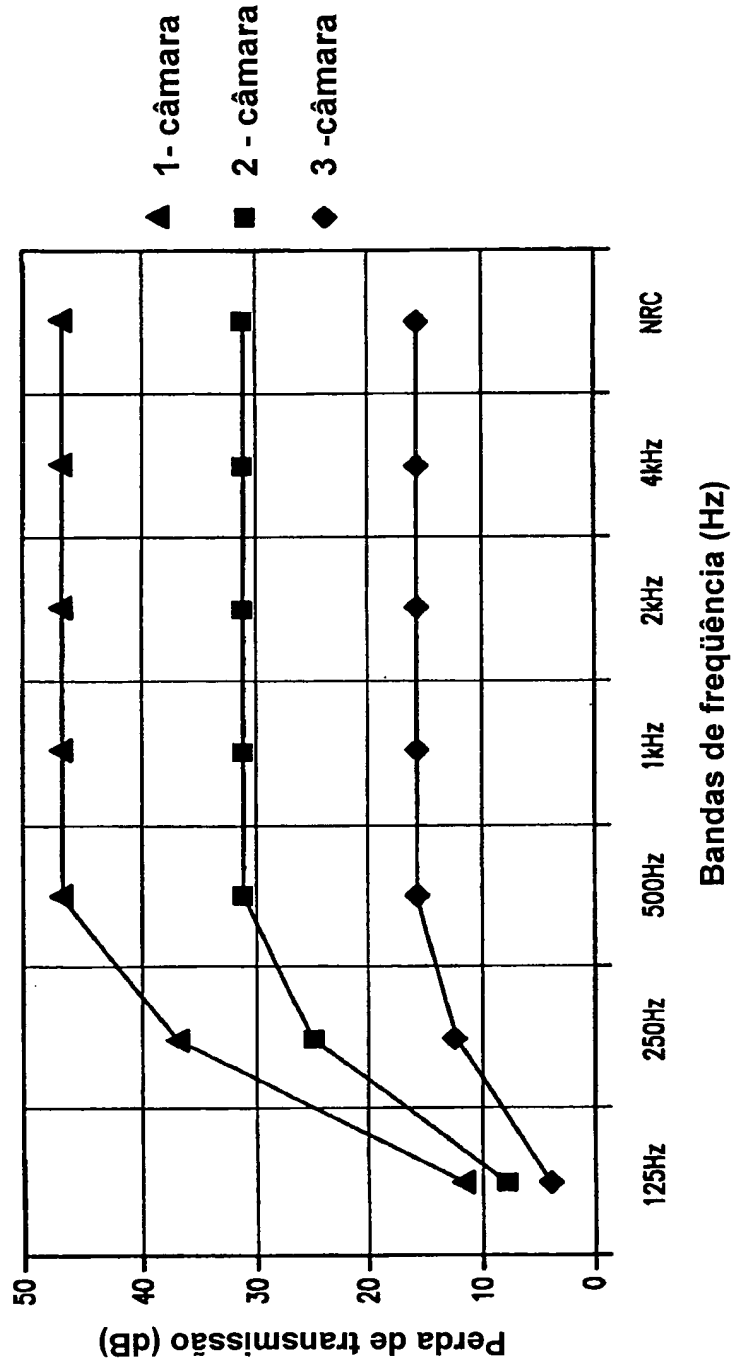


FIG. 6

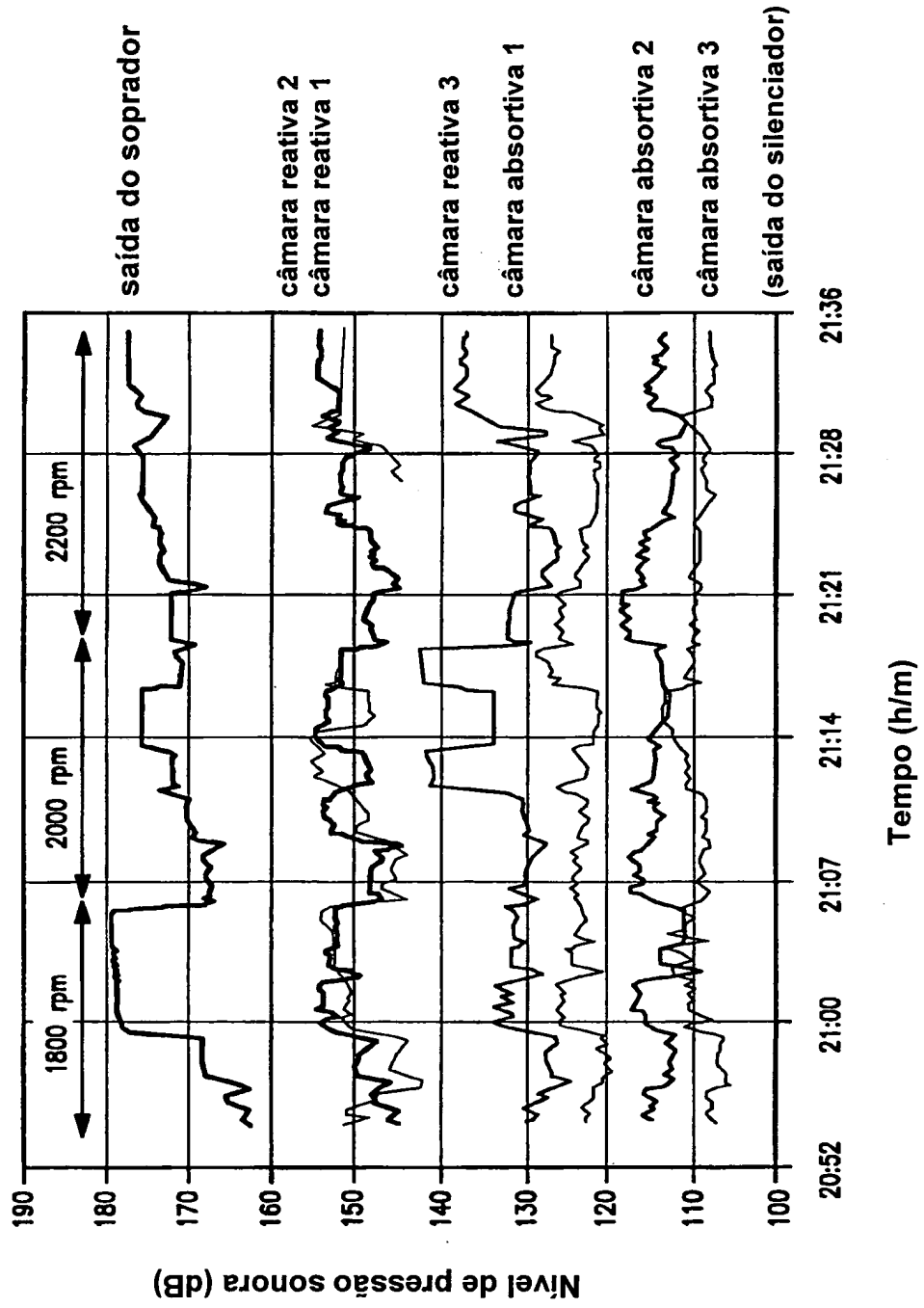


FIG. 7

RESUMO

“SILENCIADOR PARA ATENUAR RUÍDO”

A presente invenção diz respeito no geral à atenuação de ruído de soprador a vácuo usando um silenciador. Mais particularmente, a presente invenção diz respeito a um silenciador barato, confiável e eficiente para 5 reduzir os níveis de ruído em instalações de separação de gás baseada em adsorção proveniente da descarga do soprador a vácuo, ou da entrada do soprador de alimentação, para um nível de cerca de 90 dBA ou menos, na 10 abertura do silenciador para a atmosfera. O silenciador inclui pelo menos uma câmara reativa (20, 30, 32) para atenuar pulsações de baixa frequência e pelo menos uma câmara absorviva (40, 42, 44) para atenuar ruído a média a alta frequência.