

Estudo técnico e experimental sobre a eficiência energética de sopradores de parafusos comparados aos sopradores rotativos de lóbulos

Sr. Gert Van Leuven

Líder da equipe de desenvolvimento de produtos:

Atlas Copco Airpower n.v., Wilrijk, Bélgica.

Dr. Stefan Henneberger

Líder da equipe de projetos de engenharia de baixa pressão:

Atlas Copco Airpower n.v., Wilrijk, Bélgica.

Sr. Conrad Latham

Gerente de produtos de baixa pressão:

Atlas Copco Airpower n.v., Wilrijk, Bélgica.

Resumo

Para se obter uma melhoria significativa na eficiência energética da tecnologia de sopradores de ar para baixas vazões (300 até 5.000 m³/h), é necessária uma mudança tecnológica.

Houve pouca evolução técnica no mercado de sopradores para baixas vazões nos últimos 50 anos. Os sopradores de lóbulos do tipo “Roots” têm sido desenvolvidos de 2 para 3 lóbulos, especialmente para reduzir o nível de pulsação; entretanto, no que se refere à eficiência energética, os sopradores de lóbulos não obtiveram melhoras significativas.

Para se atingir uma melhora significativa na eficiência energética, no mercado de baixa pressão, toma-se uma medida que consiste na introdução de sopradores que utilizam compressão interna ao invés de compressão externa.

O presente trabalho visa demonstrar de forma teórica, utilizando uma abordagem termodinâmica, e de forma prática, que a compressão externa é menos eficiente do que a compressão interna, iniciando em 0,4 bar(e) e aumentando até 1,0 bar(e). Este trabalho promoverá uma visão sobre a melhoria na eficiência energética e a redução da temperatura de saída de ar em favor do parafuso, comprovando, assim, a quantidade significativa de economia energética que pode ser obtida.

Ao se projetar parafusos de compressores para baixa pressão (0,5 bar(e)), a vantagem tecnológica é introduzida em um novo segmento de mercado. O trabalho demonstrará que, além da economia energética, a tecnologia de parafusos possui mais vantagens em relação a ruído, vibrações e confiabilidade.

Palavras-chave: soprador de parafusos; soprador de lóbulos tipo “Roots”; eficiência energética; deslocamento positivo; compressão interna.

Introdução

Os sopradores rotativos de lóbulos, também conhecidos como sopradores tipo “Roots”, são máquinas de deslocamento positivo que consistem num par de rotores com 2 ou 3 lóbulos, que giram dentro de uma carcaça de formato oval.

Um rotor é acionado por uma fonte externa de energia, enquanto o outro rotor é acionado por

engrenagens de sincronização.

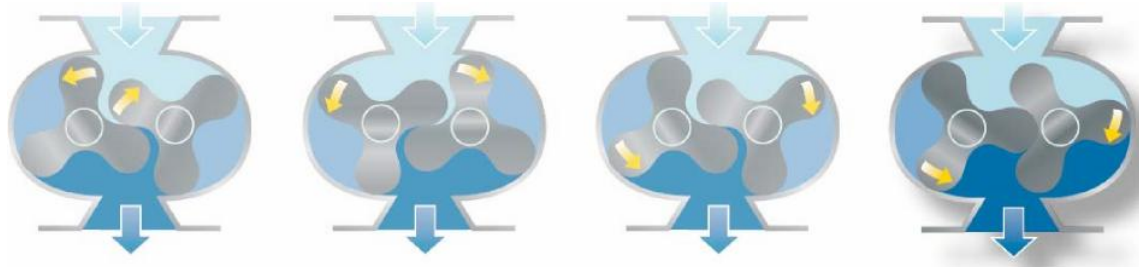


Figura 1: princípio de funcionamento de um soprador de lóbulos tipo “Roots”.

Na medida em que os rotores giram, o ar é sugado pelo lado da entrada e forçado a sair pelo lado da descarga, contra a pressão do sistema. Não há alteração no volume de ar dentro da máquina, mas ela somente desloca o ar da extremidade de sucção para a extremidade de descarga, contra a resistência do sistema na descarga.

O soprador de parafusos isentos de óleo é uma máquina rotativa de deslocamento positivo, que consiste em rotores macho e fêmea, os quais se movem em direção contrária, enquanto o volume entre eles e a carcaça diminui. Os rotores não entram em contato e são sincronizados por engrenagens sincronizadoras. Cada soprador de parafuso possui uma razão de compressão interna integrada e fixa. Isso significa que o bocal de descarga é projetado e construído com base numa geometria específica. Para se obter a melhor eficiência, a razão de compressão interna deve ser adaptada à pressão de funcionamento exigida.

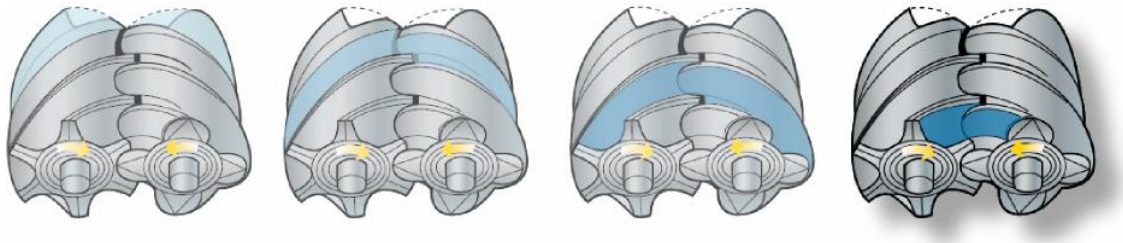


Figura 2: princípio de funcionamento do soprador de parafusos

Estudo teórico

1. Diagrama p-V para soprador de lóbulos “Roots”

No lado de descarga do soprador de lóbulos, há presença de ar em uma pressão mais alta. Quando os lóbulos do rotor descobrem a porta de saída, o ar do lado da descarga retorna no espaço estriado entre o rotor e a carcaça. Esse fluxo de retorno de ar equaliza a pressão e comprime o ar aprisionado externamente, em regime de volume constante [1-2]. Posteriormente, o ar é forçado para a linha de descarga contra pressão de todo o sistema [2-3].

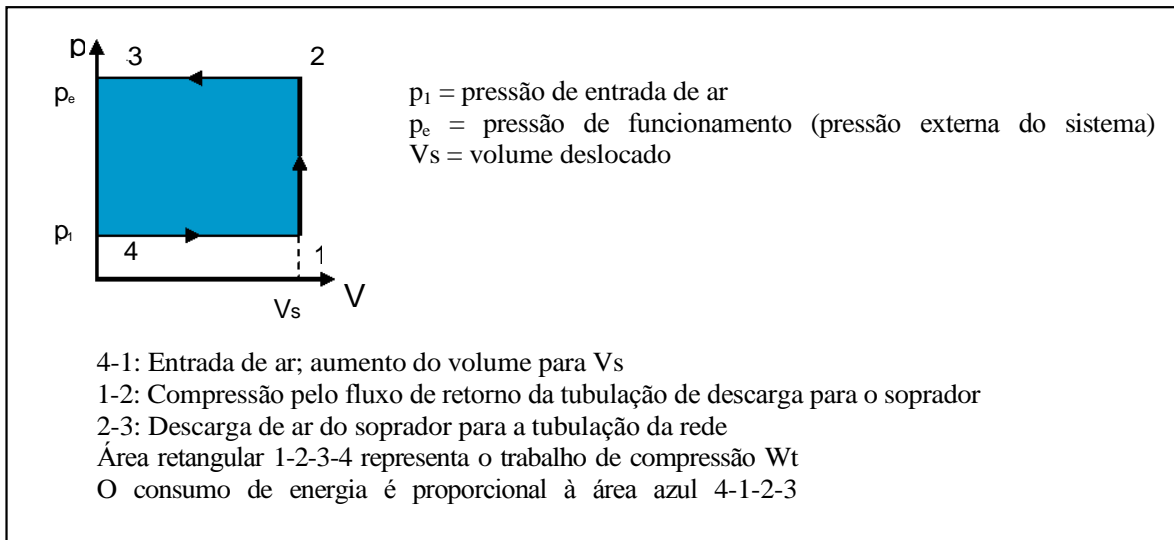


Figura 3: diagrama p - V para soprador de lóbulos

2. Diagrama p - V para soprador de parafusos.

No início do ciclo de compressão, o gás, na pressão de sucção, preenche os espaços estriados na medida em que os rotores desengrenam sob o flange de sucção. O gás continua a encher os espaços estriados até que a borda estriada do parafuso cruze a porta de entrada. Nesse ponto, o gás é preso dentro da canelura (= volume de curso V_s). No lado inferior, os rotores começam a engrenar. Na medida em que o perfil do parafuso engrena na canelura, o volume da canelura é reduzido, fazendo com que a pressão aumente. A redução no volume e o subsequente aumento na pressão continuarão enquanto o ar esteja preso na canelura. O gás é descartado da canelura quando a borda estriada do parafuso cruza a porta de descarga. (volume de descarga = V_s / v_i)

A rotação continuada e o engrenamento dos rotores forçam o gás para a linha de descarga.

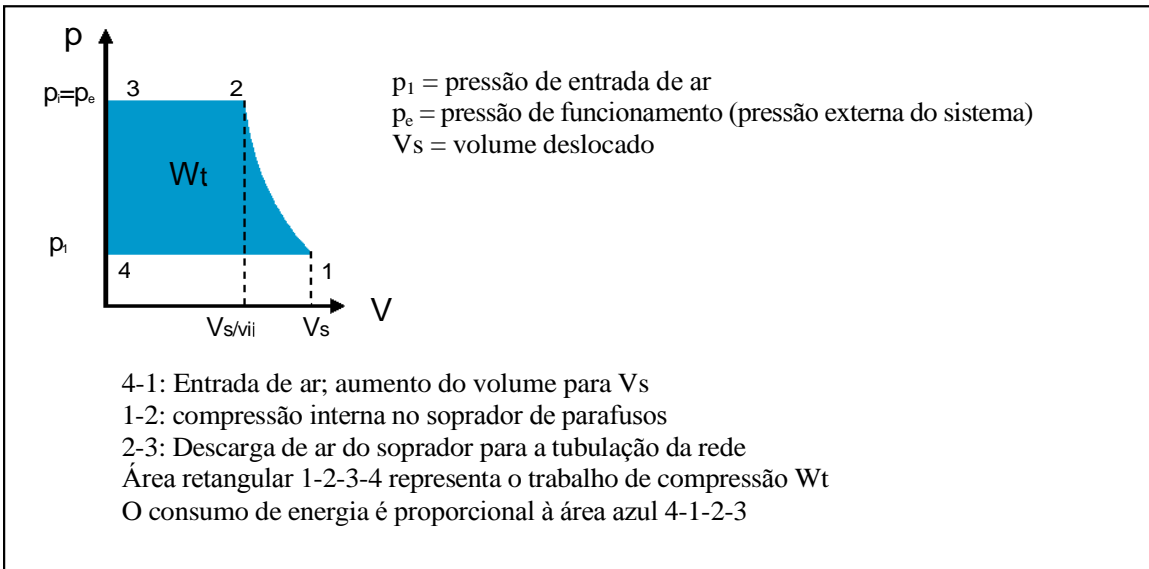


Figura 4: diagrama p - V para soprador de parafusos com $p_i = p_e$

Devido à compressão interna, o consumo de energia é reduzido, conforme representado no diagrama p-V, pela área verde na figura 5

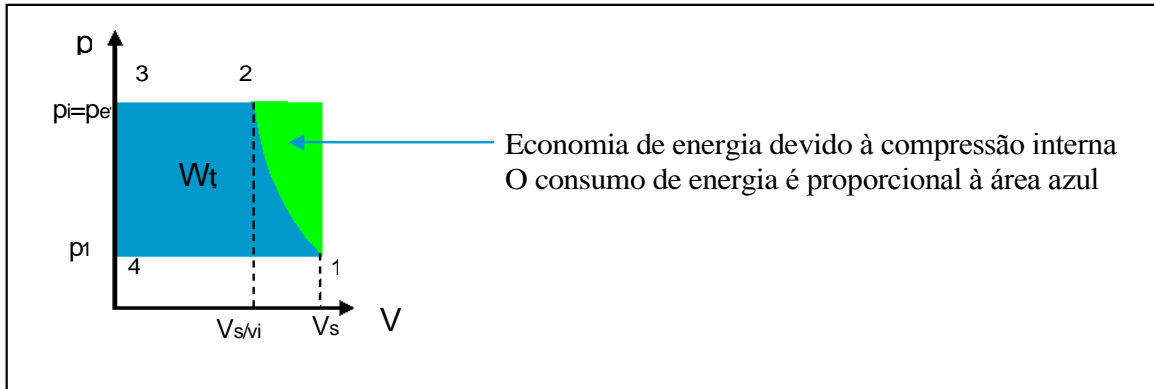


figura 5: Economia de energia: soprador de parafuso vs. soprador de lóbulos

Para a melhor eficiência, a razão de volume v_i deve ser ajustada, de modo que a razão de compressão interna seja compatível com a razão de compressão do sistema : $p_i = p_e$. Caso a razão de compressão interna não esteja compatível com a razão de compressão do sistema, o resultado será de super-compressão ou sub-compressão.

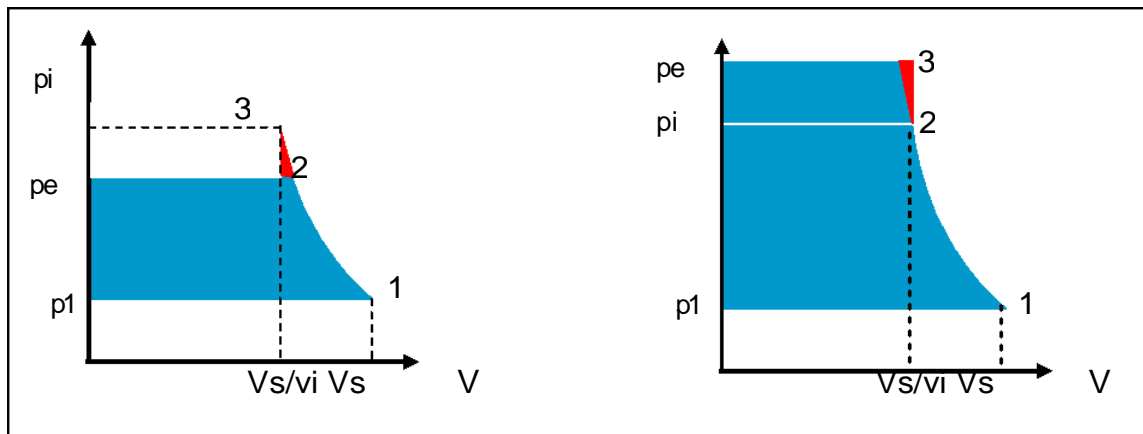


Figura 6: super-compressão (esquerda); sub-compressão(direita)

Na super-compressão, o gás é comprimido além do que o sistema exige. O gás é comprimido internamente para uma pressão mais alta e, depois expande para a pressão externa de funcionamento. Trabalho extra é exigido para comprimir o gás para a pressão interna de descarga, ao invés da pressão de descarte do sistema.

Com a sub-compressão, a pressão interna de descarga é inferior à pressão de descarga do sistema, e o gás da linha de descarga retorna à canelura e equaliza a pressão a volume constante, resultando na necessidade de trabalho extra.

3. Eficiência adiabática

O processo de compressão ideal de p_1 para p_e é um processo adiabático reversível (ou seja, isentrópico).

O trabalho isentrópico exigido é
$$p_1 V_s \frac{\kappa}{\kappa - 1} \left(\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) = C_p T_1 \left(\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right)$$

Para um “Roots”, o trabalho efetivo teórico executado é $V_s(p_e - p_1)$

Em geral, o trabalho efetivo teórico executado pode ser descrito como

$$p_1 V_s \left[\frac{\pi}{v_i} + \frac{\kappa}{\kappa - 1} \left(\frac{1}{\kappa} \cdot v_i^{\kappa-1} - 1 \right) \right]$$

Com:

v_i = razão volumétrica ($v_i = 1$ para um soprador de lóbulo)

π = razão de compressão externa p_e/p_1

$\kappa = 1,4$ (ar)

p_1 = pressão de sucção

V_s = volume deslocado

C_p = calor específico à pressão constante para o ar ~ 1004 J/kgK

$$\eta_{ad} = \frac{\text{Trabalho executado isentrópico}}{\text{Trabalho efetivo executado}}$$

Eficiência adiabática máxima teoricamente alcançável

$$\eta_{ad,max} = \frac{p_1 V_s \left[\frac{\kappa}{\kappa - 1} \left(\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) \right]}{p_1 V_s \left[\frac{\pi}{v_i} + \frac{\kappa}{\kappa - 1} \left(\frac{1}{\kappa} \cdot v_i^{\kappa-1} - 1 \right) \right]}$$

Caso os resultados da fórmula acima sejam representados graficamente, e os diferentes valores de v_i utilizados, a representação resultante é conforme a figura 7 abaixo.

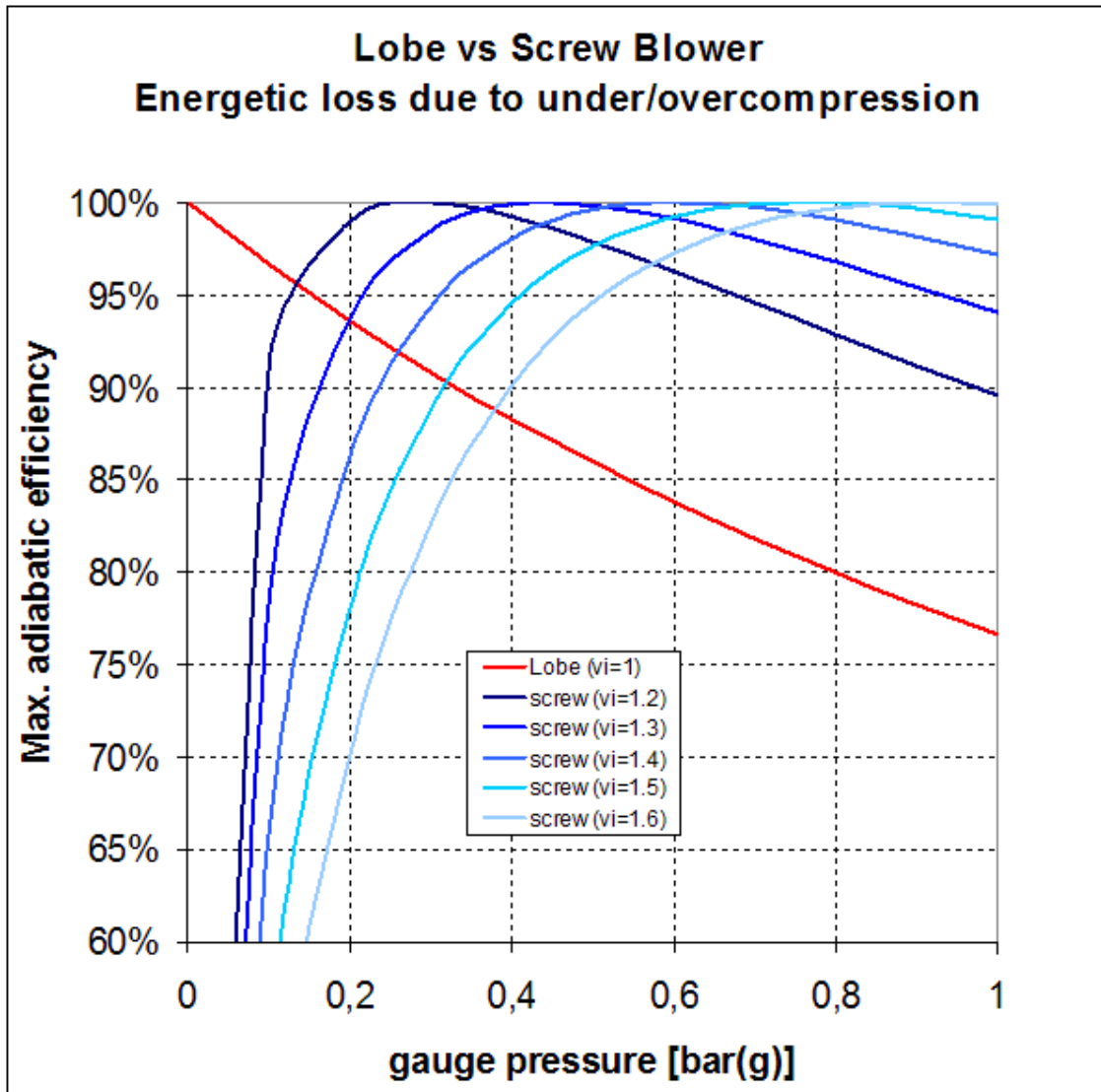


Figura 7: eficiência adiabática máxima: parafuso vs. lóbulo

A partir da figura 7, pode-se verificar que a eficiência máxima teórica no caso dos sopradores “Roots” é de 76,5%, a uma razão de compressão de 2, enquanto um soprador de parafusos otimizado poderia alcançar 100%.

Devido a perdas dinâmicas no lado da sucção e da descarga, aos vazamentos e à fricção, o trabalho efetivo de compressão aumenta e, posteriormente, a eficiência adiabática será reduzida. Esses efeitos podem ser considerados por definição da eficiência energética.

De forma mais real, as eficiências adiabáticas efetivas são representadas na figura 8.

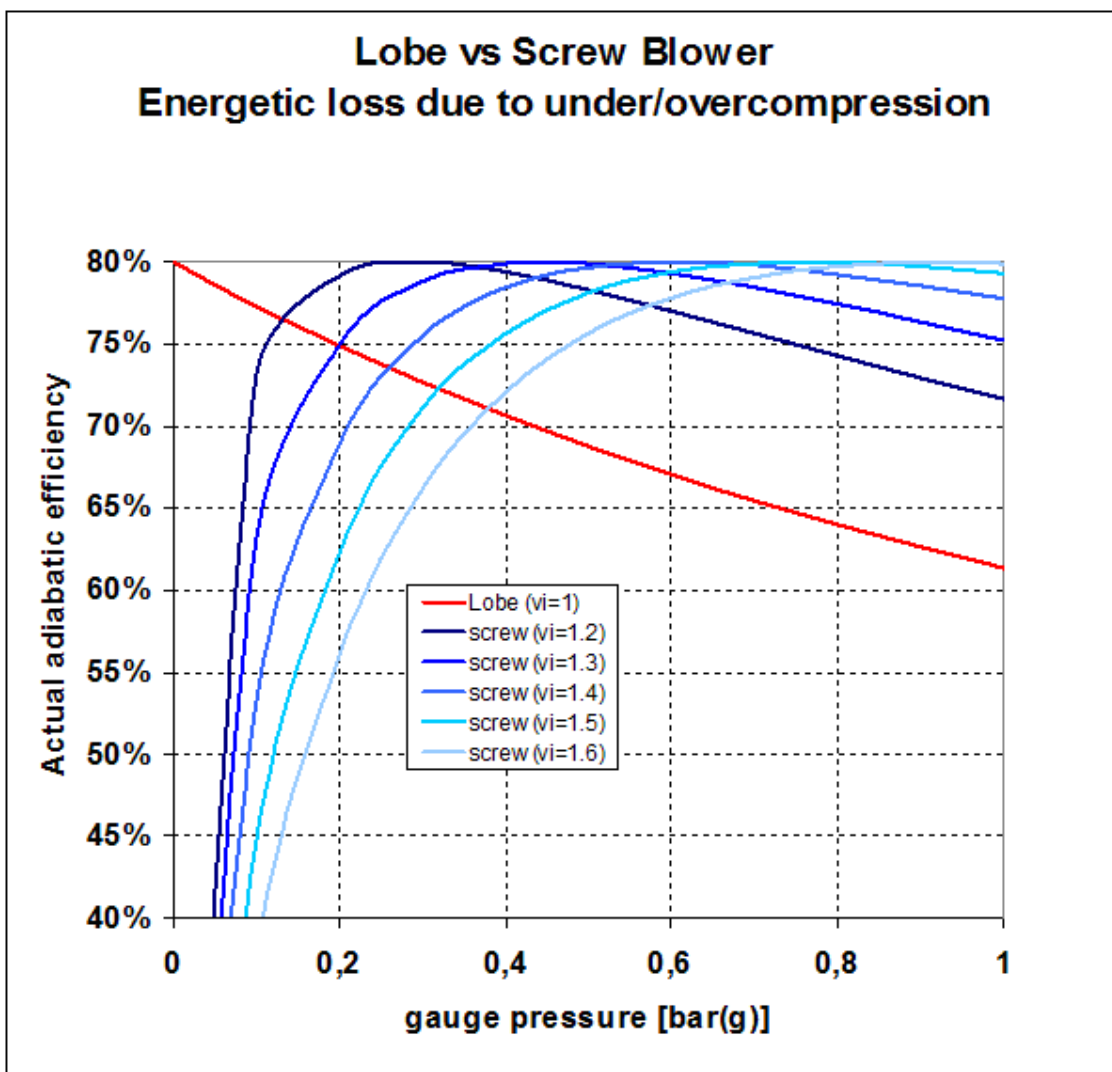


Figura 8: eficiência adiabática efetiva: parafuso vs. lóbulo

4. Temperatura de saída do ar

O trabalho de compressão adicional para o soprador de lóbulos, comparado ao soprador de parafusos, resulta na dissipação de calor extra (= perda de energia) e, conseqüentemente, em uma temperatura de descarga maior. (cfr. figura 9)

Potencia adicional exigida para o soprador de lóbulos, comparado ao soprador de parafusos = vazão mássica $\times c_p (T_{out, \text{“Roots”}} - T_{out, \text{parafuso}})$

Considerando-se que o processo de compressão ocorre muito rapidamente, a transmissão de calor pode ser ignorada e o processo é aproximadamente adiabático.

Trabalho específico efetivo $W_t = c_p (T_{out} - T_{in})$ [J/kg]

Com base no trabalho efetivo executado, a temperatura de saída de ar pode ser calculada.

Temperatura de saída de ar:
$$T_{out} = T_{in} + \frac{W_t}{c_p}$$

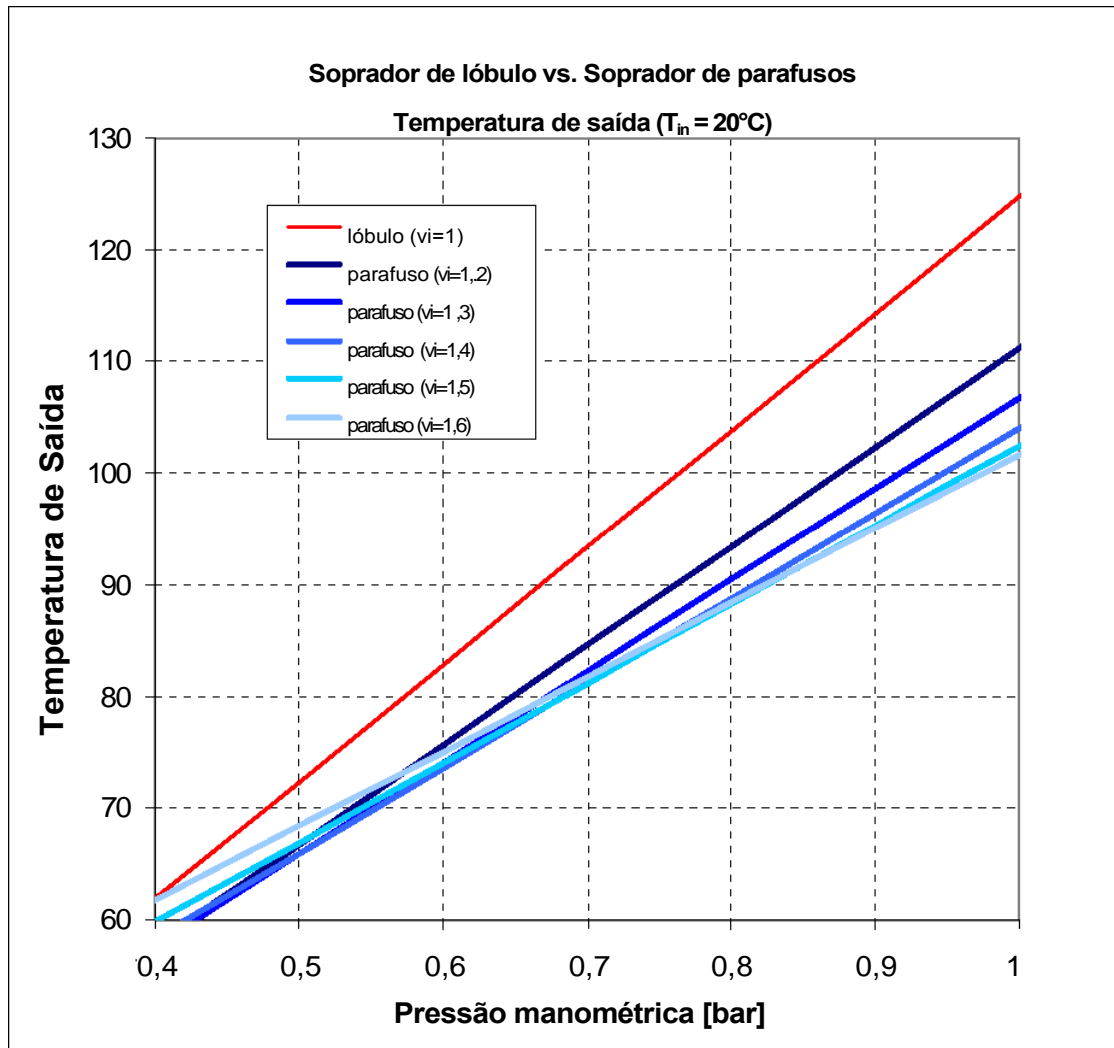


Figura 9

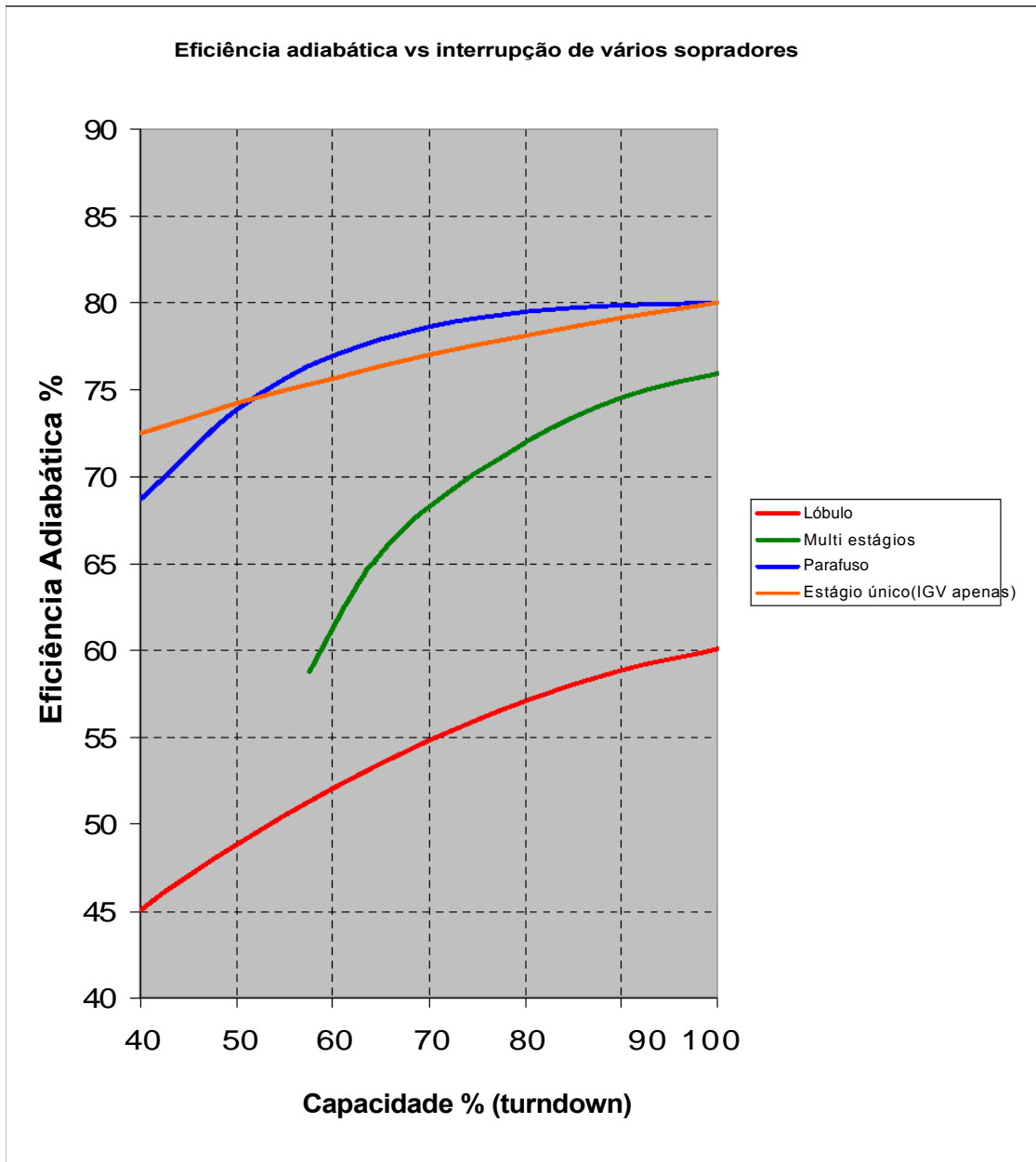
5. Eficiência ao longo da faixa operacional (turndown).

A maioria das aplicações de ar comprimido, que utiliza sopradores tanto no mercado industrial e como no de tratamento de efluentes, exige um soprador que seja capaz de alterar a vazão de ar produzida.

Isso pode ser obtido ciclando os sopradores, controlando a vazão da sucção, ajustando os difusoras na descarga, ou utilizando variadores de velocidade. Na maioria dos sopradores de baixa vazão, os variadores de velocidade são a escolha preferida.

A mudança na eficiência é uma questão muito importante para se entender, uma vez que a maioria das aplicações nem sempre requer a quantidade exata de ar que é produzida quando um soprador está funcionando a plena carga.

O gráfico abaixo mostra como a eficiência adiabática altera-se em função da variação da capacidade do soprador, ao longo da faixa operacional. Conforme pode ser observado, o soprador de parafusos mantém uma eficiência mais estável, em comparação com o soprador de lóbulos.



6. Pulsações de pressão

Tradicionalmente, os sopradores “Roots” foram projetados para rotores de dois lóbulos. Os fabricantes de sopradores de lóbulos se empenharam ao máximo para tentarem reduzir as pulsações de pressão desse projeto de dois lóbulos.

Já que a pressão na cavidade interna do soprador é inferior à pressão de descarga, quando a mesma se abre para a linha de descarga, ocorrerá um retorno repentino de fluxo, acentuando as pulsações do gás. [1]

Os rotores de três lóbulos oferecem um fluxo mais estável e, para uma redução nas pulsações de pressão, rotores helicoidais e canais especiais são usinados na carcaça do soprador para pré-preencher a câmara oposta.

O forte torque pulsante pode levar a um ruído intermitente e a problemas de vibração

(trepidação) no mecanismo de engrenagens.

Os sopradores de parafuso fornecem um fluxo mais estável e, graças a uma melhor combinação da pressão interna com a pressão externa, os níveis de pulsação de pressão são reduzidos.

A velocidade de rotação mais alta e o número maior de lóbulos resultam em uma frequência de pulsação mais alta. As pulsações com frequências mais altas são mais fáceis de amortecer e resultam em níveis de ruído mais baixos e em níveis de pulsação mais baixos na linha de descarga do sistema.

Esse projeto prolonga a vida útil dos elementos flexíveis dos sistemas de aeração e protege os sistemas de transporte pneumático contra pulsações indesejáveis.

Dentro do soprador, a redução nas pulsações resulta em poucas vibrações transmitidas aos rolamentos, aumentando a vida útil dos rolamentos.

Comparação experimental

7. “Roots” vs. parafuso

Do ponto de vista de um cliente, em geral, é difícil comparar a eficiência energética das máquinas que utilizam tecnologias diferentes se os dados disponíveis não forem apresentados comparativamente.

Os dados dos sopradores “Roots” são geralmente oferecidos de acordo com a vazão de sucção de ar e a potência do eixo do elemento soprador. Para os compressores de baixa pressão informa-se a vazão FAD (Free Air Delivery – vazão livre efetiva) na saída da unidade e o consumo de energia nos terminais de fornecimento de energia. Isso significa que as perdas no circuito de ar bem como as perdas de transmissões elétricas e mecânicas não são consideradas nos dados dos sopradores de lóbulos, ao passo que são levadas em conta nos dados dos compressores de baixa pressão. Para tornar-se os dados disponíveis dos sopradores “Roots” comparáveis às outras tecnologias, as eficiências e perdas dos outros componentes do soprador devem ser determinadas.

O circuito de ar, antes e após o elemento do soprador, inclui o filtro de entrada de ar, o silenciador de saída de ar e a válvula de retenção. A perda de carga desses componentes deve ser adicionada aos dados de desempenho dos elementos do soprador “Roots”.

As perdas totais de transmissão desde os terminais de fornecimento de energia até a potência do eixo do elemento do soprador constituem as perdas do motor elétrico e as perdas por transmissão (acionamento por correia) do eixo do motor ao elemento.

Essas perdas geralmente variam em função do tamanho do soprador e do ponto de operação. A tabela abaixo lista os valores típicos para os sopradores “Roots” pequenos (1.000 m³/h) operados a 0,7 bar(e) e sopradores médios (5.000 m³/h) operados a 0,5 bar(e).

Perdas no circuito de ar		Sopradores pequenos tipo “Roots” 1000 m ³ /h, 0,7 bar(e)	Sopradores médios tipo “Roots” 5000 m ³ /h, 0,5 bar(e)
Perda de carga do filtro de ar	[mbar]	20	40
Perda de carga do silenciador	[mbar]	15	25
Perda de carga na válvula de retenção	[mbar]	10	15
Consumo adicional de energia	[%]	6	9,4
Perdas nas transmissões mecânica e elétrica		Sopradores pequenos tipo “Roots” 1000 m ³ /h, 0,7 bar 30 kW	Sopradores médios tipo “Roots” 5000 m ³ /h, 0,5 bar 150 kW
Perdas na correia	[%]	4	5
Eficiência do motor	[%]	90	95
Perdas totais de transmissão	[%]	14	10

É claro que os sopradores de parafusos também apresentam perdas no circuito de ar e na transmissão, porém elas já foram consideradas nos dados do equipamento, pois as medições consideram o fornecimento total de energia e a vazão no bocal de descarga do soprador.

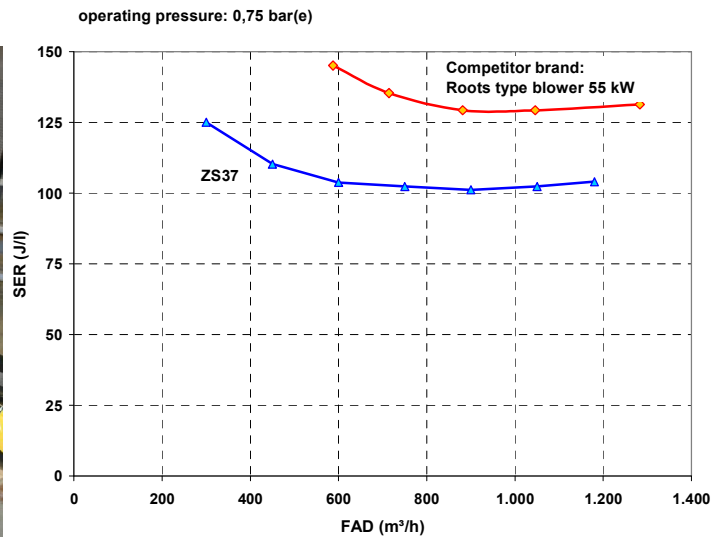
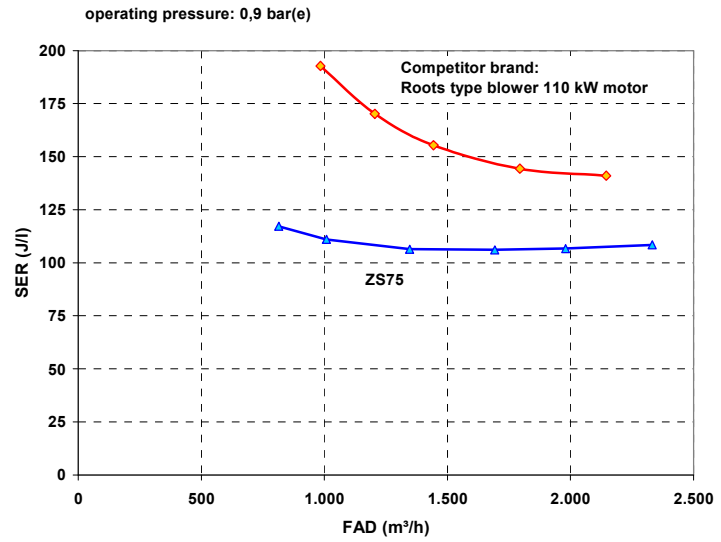
8. Teste de laboratório: tecnologia “Roots” vs. parafuso

Já se demonstrou que nem os dados do folheto e nem os dados de teste de diferentes fornecedores, que utilizam tecnologias diferentes, podem ser utilizados para analisar a eficiência energética. A única maneira de comparar o desempenho das máquinas é o teste de laboratório, em que tecnologias diferentes trabalham no mesmo ambiente, sob condições de operação iguais, enquanto se utiliza o mesmo equipamento de medição.

Mede-se a energia consumida, retirada dos terminais de fornecimento de energia do soprador instalado, bem como a vazão de descarga, no flange de saída do sistema do soprador, de acordo com a ISO 1217 ed.3 teste de aceitação total (Ppack).

A série de testes foi realizada em diferentes níveis de energia e em várias marcas de fabricantes de sopradores “Roots”. Os resultados dos testes são expressos no requisito de energia específica (SER (em J/l)), que demonstra a relação da energia consumida (em kW) dividida pela vazão livre efetiva. (FAD em m³/h).

Na primeira configuração dos testes, um soprador “Roots” de três lóbulos equipado com um motor de 110 kW e conectado um conversor de frequência instalado separadamente é comparado a um soprador de parafusos com motor de 75 kW, com conversor de frequência integrado. O resultado, na vazão máxima do soprador “Roots” (2.145 m³/h), demonstra um consumo de energia específica 32,1 % maior (“Roots”: 141,0 J/l, parafuso: 106,7 J/l). Na vazão mínima de (984 m³/h), a diferença no requisito de energia específica é de 64,4 % (“Roots”: 191,7 J/l, parafuso: 117,2 J/l).



Além disso, em relação a esses testes, decidiu-se permitir que TÜV Rheinland presenciasse o teste do soprador de parafusos contra o “Roots” de três lóbulos. O certificado abaixo apresenta os resultados do teste independente de desempenho.

Certificate

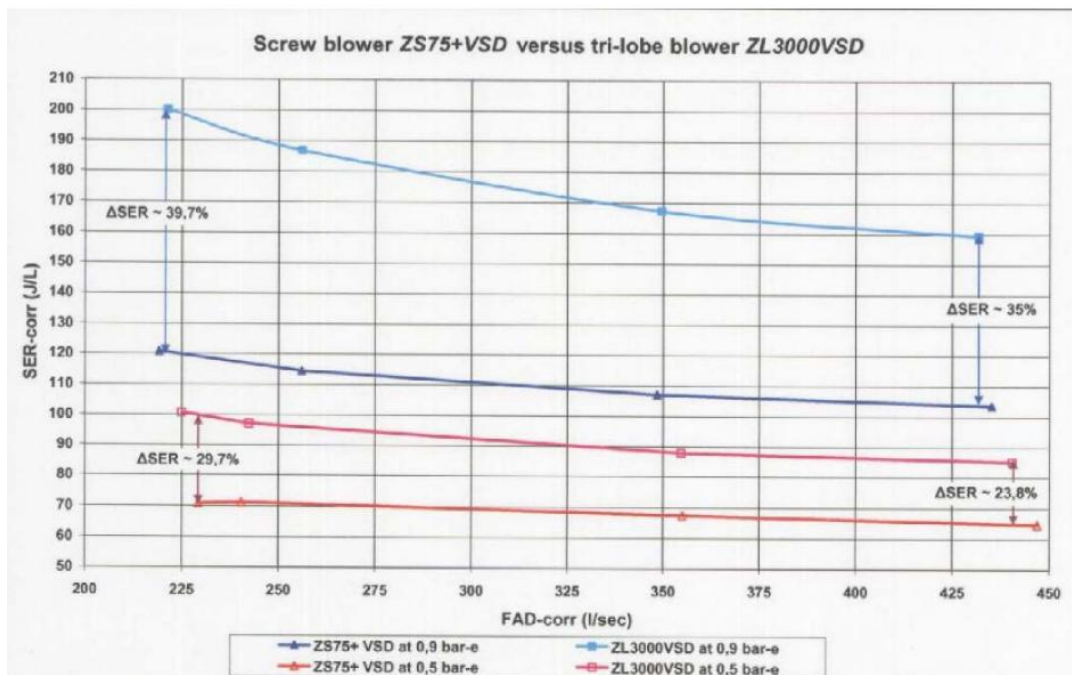
ET 333 2009 C2

The company
Atlas Copco Airpower n.v.
 Oil-free division
 Boomsesteenweg 957
 B-2610 Wilrijk (Belgium)

made a comparison investigation of a screw blower and a tri-lobe blower each with variable speed drive under the supervision of TÜV Rheinland based on performance tests according the standard

ISO 1217, 4th. edition - Displacement compressors – Acceptance Tests.

The aim was to compare the performance data of the two blowers



Nota: TÜV, Technischer ÜberwachungsVerein ou Associação de Inspeções Técnicas, é uma organização internacional independente que é especializada na avaliação da segurança e qualidade de tecnologia. TÜV é reconhecida mundialmente por sua independência, neutralidade, experiência e padrões rigorosos.

9. Conclusões

Neste trabalho, foi considerado um estudo energético entre o soprador tradicional “Roots” e o soprador de parafusos. Os resultados experimentais demonstram uma forte correlação com as leis termodinâmicas básicas e apresentam o soprador de parafusos como uma máquina mais eficiente, com redução de até 50% no consumo energético.

Referências

[1] W. Soedel, Sound and vibrations of positive displacement compressors, CRC press, 2007, pp. 17-19.