

CONDICIONAMENTO DE FELTRO – UM ESTUDO DE CASO SOBRE A INFLUÊNCIA E O PROJETO DE SISTEMAS DE VÁCUO

Autor: Jörg Zürcher ¹
Rafael Mendes ²
Wagner Canelhas ³

¹ Gerente de Projetos Sênior – Sistemas de Vácuo – MAN Diesel & Turbo (Suíça)

² Engenheiro de Turbomáquinas – MAN Diesel & Turbo (Alemanha)

³ Engenheiro de Vendas – MAN Diesel & Turbo do Brasil

RESUMO

O processo de deságue e condicionamento de feltro sofre constante influência da qualidade do sistema de vácuo. A sincronia operacional entre os níveis de vácuo e a permeabilidade do feltro é fator de grande relevância a considerar-se em projetos de sistemas de vácuo. Tais premissas podem influenciar significativamente a vida útil do feltro e impactar a disponibilidade do processo.

A variação da permeabilidade do feltro ao longo de sua vida útil requer permanente adequação no nível de vácuo. Com o aumento da saturação do feltro e conseqüente queda de sua permeabilidade, o sistema de vácuo deve estar apto a compensar a vazão requerida pelo sistema e ajustar o vácuo para um nível mais elevado.

Caracterizando-se como turbomáquinas de princípio operacional dinâmico, os sopradores de vácuo centrífugos se adaptam ao espectro operacional de vazões e níveis de vácuo distribuídos ao longo do tempo de campanha de um feltro, tornando possível suprir de ótima forma a flexibilidade requerida pelo sistema. Tal tecnologia também se prova mais eficiente energeticamente quando comparada ao conceito das bombas de vácuo tradicionais.

Dando seqüência ao entendimento dos fundamentos operacionais de cada tecnologia, serão discutidas as curvas de resistência do sistema (vazão e pressão) com relação às curvas de deságue de feltro conforme propostas por De Crosta (1980) e amplamente adotadas em projetos de sistemas de vácuo. Ambas as tecnologias para geração de vácuo poderão, então, ser comparadas sob a luz dos aspectos relativos ao mais adequado condicionamento de feltro.

Palavras-chave: condicionamento de feltro, projeto de sistemas de vácuo, deságue eficiente, sopradores de vácuo, bombas de vácuo.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de vácuo em máquinas de papel são aplicados em diversas seções em serviços relacionados ao transporte (em rolos

pick-up), deságue direto da folha (caixas e rolos de sucção e sistemas patentes) ou condicionamento de feltro em caixas seca-feltros – amplamente tratadas no mercado pelo termo, em inglês, *uhle boxes*.

As *uhle boxes* são responsáveis pelo deságue e condicionamento de feltro, de forma que sua ação tem influência indireta na secagem do papel. O próprio condicionamento e deságue, porém, é de grande importância na eficiência da etapa de secagem, assim como em sua vida útil e na disponibilidade operacional da planta.

O condicionamento de feltro é composto por diversas etapas de limpeza química e mecânica, que, majoritariamente, aumentam a umidade do feltro. Dessa forma, a aplicação de vácuo nas *uhle boxes*, além retirar a água advinda da folha e absorvida pelo feltro, deve ser capaz de remover esse adicional de umidade relativo à água adicionada para sua limpeza. O design correto das caixas seca-feltros, assim como a correta seleção de seus níveis de vácuo e vazão, aumentam a vida útil do feltro e elevam a eficiência do processo de secagem.

Outro ponto de grande importância para os sistemas de secagem refere-se a seu elevado consumo energético na planta – podendo superar 20% do total. Dessa forma, o completo entendimento de funcionamento e casos operacionais é essencial para a realização de otimizações energéticas no processo.

Apesar do grande peso no consumo energético global, o mercado tem como prática comum não considerar a multiplicidade de casos operacionais no sistema de vácuo. Assim, tanto o condicionamento do feltro quanto a máxima eficiência do processo apresentam grande potencial de otimização.

Conceitos de sistemas de vácuo

O entendimento do princípio de funcionamento da máquina geradora de vácuo, assim como as necessidades fluidodinâmicas do sistema, é essencial para o dimensionamento de um sistema com alta eficiência.

Tendo-se em vista essa importância, será apresentado a seguir o princípio operacional dos equipamentos mais importantes utilizados para geração de vácuo em plantas de papel e celulose: bombas de anel líquido e sopradores de vácuo.

Adicionalmente a essas duas tecnologias, podem ser utilizados ventiladores em plantas de papel e celulose para baixos níveis de vácuo (até 15 kPa). Nas seções de condicionamento de feltro, todavia, não se adota essa concepção de máquina, uma vez que os níveis de vácuo não são adequados. Apesar da distinta concepção de máquina, seu princípio operacional assemelha-se ao dos sopradores de vácuo, apresentado a seguir.

Bombas de anel líquido

As bombas de anel líquido são máquinas de deslocamento positivo que geram vácuo pelo movimento de um rotor de palhetas excêntrico à carcaça que gira envolta por um anel formado de água de selagem, conforme ilustrado na Figura 1.

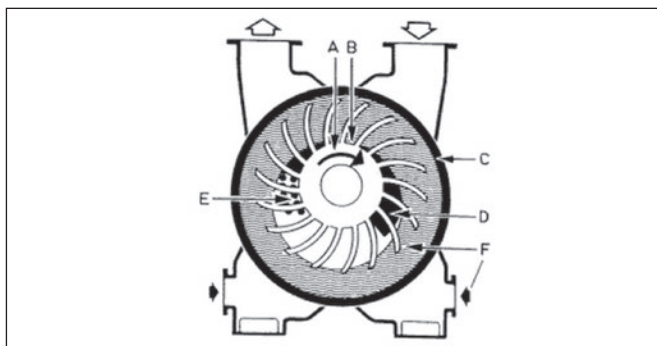


Figura 1: Desenho esquemático em corte de uma bomba de selo líquido

O movimento rotativo excêntrico à carcaça das palhetas do rotor forma diversas câmaras de compressão cujo volume é reduzido pelo aumento da proximidade ao anel formado por líquido durante a rotação. Tal processo de compressão é aplicado para gerar vácuo, uma vez que a descarga do sistema se dá à pressão atmosférica.

A presença de câmaras que deslocam o fluido de uma região de baixa para uma de alta pressão, impedindo que esse retorne, caracteriza o princípio de funcionamento das bombas de selo líquido.

A Figura 2 mostra uma curva genérica da máquina de desloca-

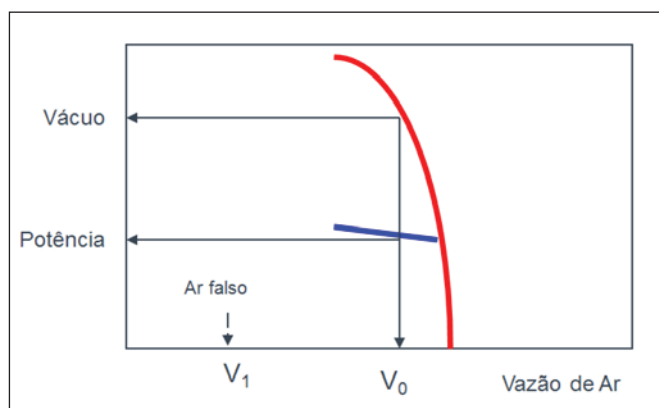


Figura 2: Curva operacional genérica para bombas de vácuo

mento positivo, na qual é apresentado, de maneira ilustrativa, o comportamento operacional das bombas de selo líquido para geração de vácuo.

Observando-se a curva apresentada, pode-se entender o perfil operacional das bombas de vácuo, assim como sua variação de potência.

Por se tratar de uma máquina de deslocamento positivo (considerando-se em rotação constante), o espectro de vazões é muito estreito, uma vez que as câmaras de compressão formadas provocam um deslocamento contínuo de volume.

Nesse estreito espectro de vazão, o comportamento da máquina ocorre da seguinte maneira: à medida que há necessidade de reduzir a vazão, o nível de vácuo tende a elevar-se (menores pressões absolutas) e ocorre leve incremento no consumo energético.

Em contrapartida à pouca variação para os valores de vazão na máquina, há uma grande flexibilidade de níveis de vácuo. As variações podem ocorrer com poucas alterações no sistema, podendo ocasionar bruscas modificações dos níveis de vácuo. Além disso, em caso de necessidade adicional de vazão, o nível de vácuo gerado cai bruscamente e de maneira assintótica.

O controle de vazão é realizado em geral por admissão de "ar falso", correspondendo à abertura de uma entrada no sistema de ar da atmosfera, garantindo a vazão requerida pelo sistema e evitando, por consequência, a ocorrência de sobrevácuo. Apesar de a vazão no sistema variar a montante da admissão atmosférica através do feltro, a que ocorre por meio da bomba permanece constante, assim como a energia consumida.

Sopradores de vácuo

Os sopradores de vácuo correspondem atualmente aos sistemas de maior eficiência para geração de vácuo nas plantas de papel/celulose e também os mais adequados ao serviço de condicionamento de feltro. Além disso, o notavelmente mais amplo espectro de vazões para operação da máquina (ainda que em rotação constante e sem admissão de "ar falso") torna esse tipo de máquina mais versátil à aplicação.

Diferentemente das bombas de anel líquido, os sopradores de vácuo são turbomáquinas de princípio dinâmico. Dessa forma, o movimento rotativo do impelidor confere energia cinética ao ar, ocasionando aumento de pressão de maneira gradual e uniforme, sem que haja formação de câmaras de compressão ou fortes pulsações de descarga.

Para os sopradores de simples estágio, o ar entra na máquina em direção axial ao eixo do rotor, sendo direcionado de forma radial pelo movimento rotativo do impelidor à saída tangencial da máquina. O processo de compressão ocorre sem presença de água de selagem no interior do equipamento, apresentando eficiência consideravelmente superior à obtida com a utilização das bombas de selo líquido.

A concepção construtiva de um soprador de vácuo de simples estágio e sua instalação são apresentadas pelas Figuras 3 e 4, respectivamente.

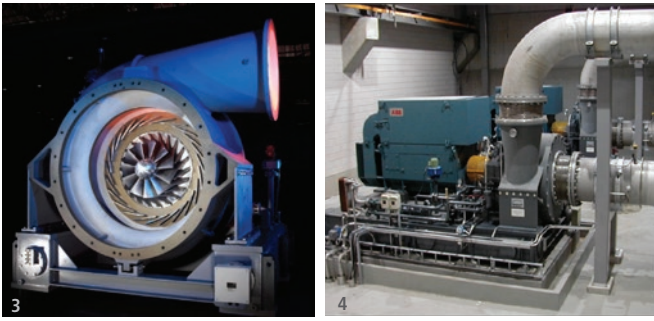


Figura 3 e 4: Soprador de vácuo de simples estágio em detalhe instalação de equipamento

Também são utilizados em plantas de papel e celulose sopradores de vácuo centrífugos de múltiplos estágios, podendo-se obter até quatro distintos níveis de vácuo em uma mesma máquina. O espectro de vazões para ambas as concepções a rotação constante se dá como apresentado abaixo:

Soprador centrífugo de simples estágio: de 35% a 115%
Soprador centrífugo de múltiplo estágio: de 80% a 115%

Ambas as máquinas de simples ou múltiplo estágio, por serem de princípio operacional dinâmico, apresentam comportamento operacional como mostrado no diagrama da Figura 5.

Em complemento ao descritivo do princípio operacional das turbomáquinas, a curva de performance dos sopradores centrífugos ilustra seu amplo espectro de vazões, assim como a curva mais plana de pressões em comparação ao comportamento vertical das bombas de selo líquido quanto ao nível de vácuo.

É também notável a redução de consumo energético à medida que se diminui a vazão requerida – comportamento extremamente pertinente à operação em cargas parciais.

Os sopradores centrífugos de simples estágio são dotados de difusores variáveis, conforme ilustrados na Figura 6.

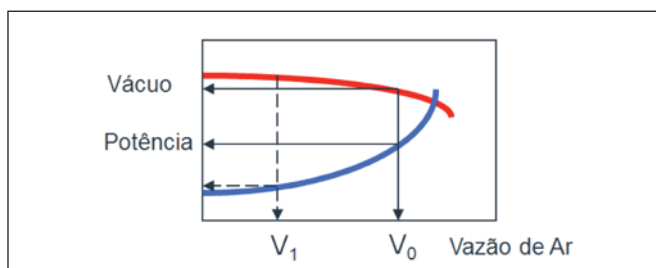


Figura 5: Curva operacional genérica para sopradores de vácuo centrífugos

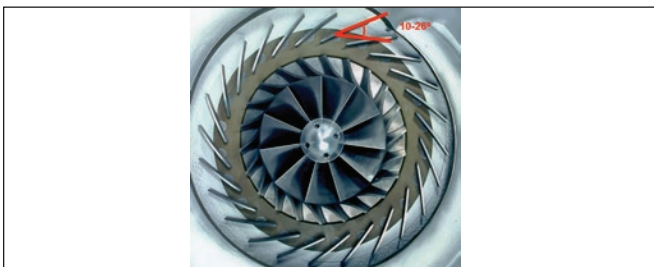


Figura 6: Difusores variáveis em um soprador de vácuo de simples estágio

O desenvolvimento dos difusores ajustáveis já foi amplamente implementado pela indústria de turbomáquinas em diversas aplicações, representando uma solução ideal ao condicionamento de feltro, por proporcionar maior flexibilidade de vazões e redução adicional de consumo energético em cargas parciais.

A curva de desempenho, assim como parâmetros operacionais exemplares para esse tipo de máquina, é apresentada na Figura 7.

Segundo o diagrama operacional apresentado, cada ângulo do difusor corresponde a uma curva distinta de vácuo gerada. O controle desse mecanismo se dá de maneira automática, de forma a manter um nível de vácuo constante na sucção da máquina. À medida que diminui a vazão requerida pelo sistema, reduz-se o ângulo do difusor, de modo que a curva de máquina se altera para fornecer o mesmo nível de vácuo para o novo valor de vazão.

Além disso, nota-se considerável queda de consumo energético em carga parcial, podendo chegar a menos de 40% do consumo nominal devido à redução de vazão na máquina. Essa redução de consumo energético ocorre como consequência da menor demanda de fluxo através do feltro (por exemplo, menores permeabilidades ou diferentes tipos de papel), sem a necessidade de variação de rotação da máquina.

Tendo-se em vista essa consideração, no caso de ambos os equipamentos operarem em rotação constante, o consumo energético dos sopradores centrífugos para condicionamento de feltro em carga parcial poderá ser até 70% inferior ao consumo correspondente ao respectivo consumo das bombas de selo líquido.

Conceitos Sobre demandas do sistema e deságue

O principal modelo que correlaciona as demandas de vácuo para condicionamento de feltro com seu deságue, foi proposto no início da década de 1980 por De Crosta (1980) em estudo publicado pela Tappi, na Canadian Pulp & Paper.

Ao longo dos anos, as equações logarítmicas então propostas foram refinadas e ajustadas para diversos tipos de feltro. O comportamento apresentado em seu estudo, porém, permanece sendo observado até os dias atuais.

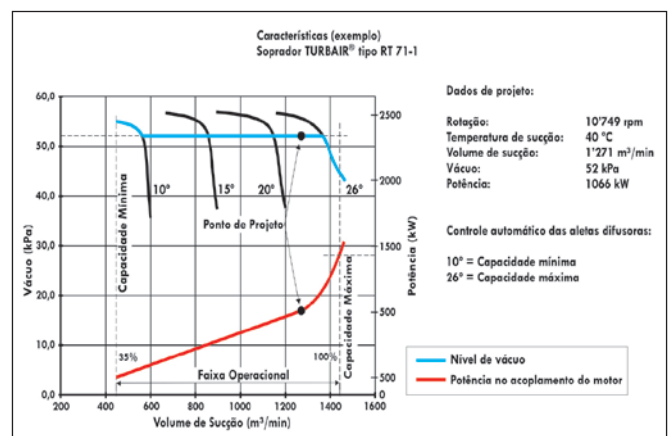


Figura 7: Curva de desempenho de um soprador centrífugo de vácuo de simples estágio com difusores variáveis

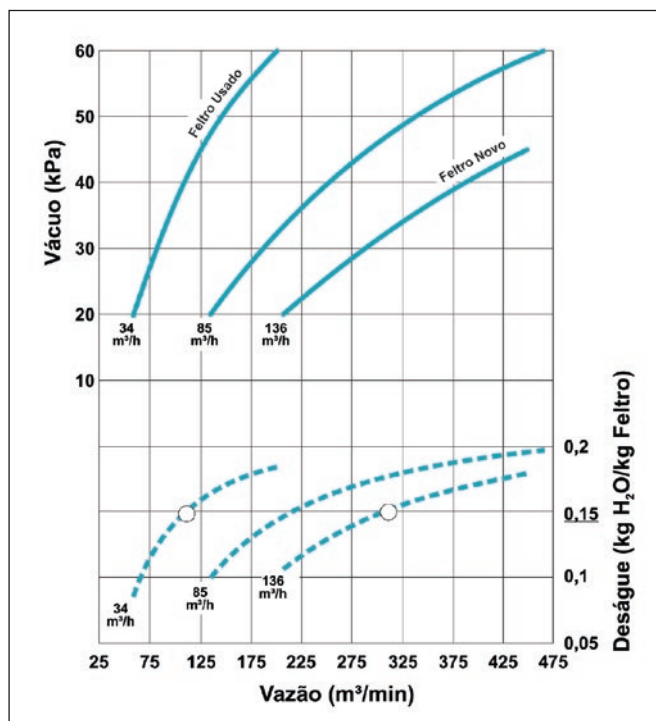


Figura 8: Curvas de De Crosta (1980) para deságue e condicionamento de feltro

Dessa maneira, com a finalidade de se ilustrar o comportamento de um feltro, assim como as respectivas demandas de vácuo para seu condicionamento ao longo de sua vida útil, a Figura 8 apresenta as curvas de deságue (De Crosta, 1980).

Pode-se observar, pelas curvas apresentadas na Figura 1, o comportamento do feltro relativo à restrição ao fluxo, assim como sua consequente redução de permeabilidade ao longo da vida útil.

Os valores de permeabilidade foram primeiramente apresentados por De Crosta em seu mesmo estudo de como a vazão de água em cfm imposta por uma coluna de água de 0,5 polegadas atravessa a área de um pé quadrado do feltro. Para facilitar o entendimento e a visualização, os respectivos dados de permeabilidade são apresentados em unidades de Sistema Internacional (m^3/h).

Na parte superior do diagrama são apresentadas as curvas de resistência do sistema, relacionando o nível requerido de vácuo a sua respectiva vazão para cada diferente valor de permeabilidade de feltro. Esse comportamento pode ser também entendido como a curva de resistência ao fluxo (perda de carga) imposta pelo feltro. A partir dessas curvas podem ser estabelecidas as demandas de vazão para o condicionamento de feltro nas *uhle boxes* ao longo da vida útil do feltro.

Diretamente relacionadas às curvas de perda de carga, são apresentadas na parte inferior do diagrama as curvas de deságue específico do feltro (em kg de água/ kg de feltro) para cada respectivo nível de vácuo e vazão impostos ao feltro em diferentes etapas de sua vida útil. Como filosofia de projeto para sistemas de secagem tende-se a buscar o deságue de maneira uniforme ao longo de toda a vida útil do feltro.

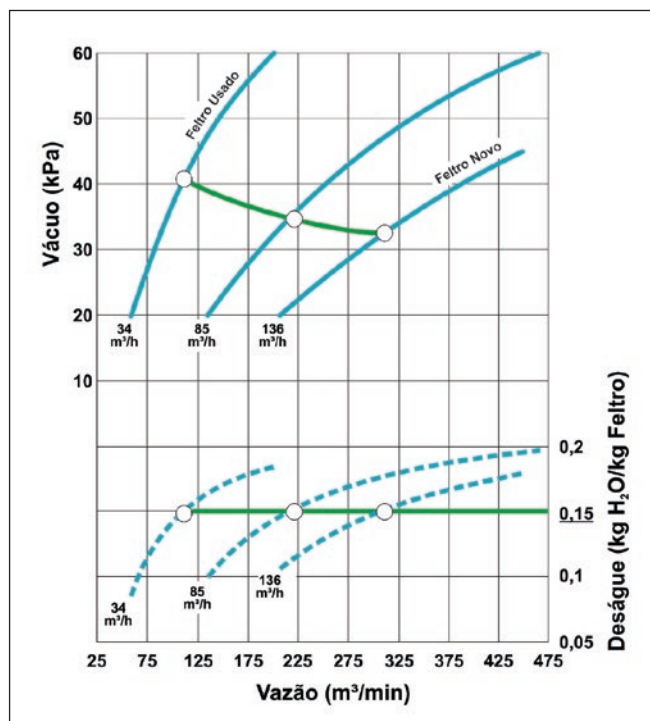


Figura 9: Níveis de vácuo e vazão para diferentes permeabilidades de um feltro

Curva ótima de deságue para condicionamento de feltros

Considerando-se contínuo o processo produtivo de papel e celulose, assim como as fontes úmidas aplicadas ao feltro em seu processo de limpeza química e mecânica (lavagem), busca-se um deságue também uniforme ao longo da vida útil do feltro, conferindo-se também continuidade ao processo.

À luz das curvas de deságue (De Crosta, 1980), é apresentado na Figura 9 o comportamento fluidodinâmico do sistema e sua respectiva demanda de vácuo ao longo de sua vida útil por meio da curva plotada na parte superior. Como premissa de projeto considera-se uma taxa de deságue constante de $0,15$ kg de água por kg de feltro.

Por meio da plotagem das curvas, ligando-se os pontos nas curvas de vácuo com valores de mesmo deságue, pode-se observar claramente o comportamento da demanda de vácuo ao longo da vida útil do feltro, assim como suas respectivas demandas de vazão.

Notavelmente, as variações de vazão de ar através do feltro apresentam-se de maneira mais acentuada que as relativas aos níveis de vácuo.

Os valores obtidos também são descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Níveis de vácuo e vazão para condicionamento ótimo de feltro (deságue constante)

Feltro	Usado (34 m^3/h)	Médio uso (85 m^3/h)	Novo (136 m^3/h)	Variação (%)
Vazão de ar (m^3/min)	112	220	315	281 %
Vácuo (kPa)	40,5	35	32,5	-19,8 %
Taxa de Deságue ($kg H_2O/kg$ feltro)	0,15	0,15	0,15	0 %

A partir desse comportamento serão discutidas as influências operacionais, no consumo energético e na vida útil do feltro, para o comportamento operacional das bombas de vácuo e sopradores centrífugos de vácuo, assim como suas premissas de projeto.

Bombas de anel líquido para condicionamento de feltro

Como referido anteriormente, as bombas de anel líquido apresentam estreito espectro de vazões, podendo também impor ao sistema grandes variações nos níveis de vácuo. Ambas as características, relacionadas tanto aos espectros de vazão quanto aos níveis de vácuo, mostram-se não adequadas à demanda do sistema para condicionamento de feltro.

Esse tipo de equipamento, no entanto, também pode ser aplicado a sistemas de condicionamento de feltro. Partindo-se de premissas adequadas de projeto e considerando-se as especificidades do feltro, pode-se evitar a ocorrência de fenômenos indesejados, os quais serão discutidos nesta seção.

A curva das bombas de selo líquido, aplicada a um sistema de condicionamento de feltro, é apresentada na Figura 10 (em preto) conjuntamente às curvas de deságue (De Crosta, 1980):

No exemplo apresentado na Figura 9, a bomba de vácuo encontra-se projetada para a condição nominal de operação do feltro. Para essa concepção de *design*, podem ser realizadas as seguintes considerações:

Feltro Novo (subvácuo):

Devido à sua alta permeabilidade, a vazão requerida pelo sistema supera a que a bomba é capaz de suprir em um nível adequado de

vácuo. Dessa forma, o condicionamento de feltro se dá de maneira pobre, uma vez que o vácuo é deficiente.

Esse fenômeno, conhecido na indústria como *vacuum tracking*, acarreta velocidades de operação mais lentas, após a troca de feltro. Outra opção realizada pela indústria neste caso é a inundação do feltro previamente à sua instalação, de modo a se reduzir sua permeabilidade com a finalidade de o sistema de bombas ser capaz de impor níveis adequados de vácuo.

Feltro Antigo (sobrevácuo):

Devido à sua baixa permeabilidade a demandar valores de vazão mais baixos, a tendência da bomba de selo líquido é a de fazer sobrevácuo no sistema.

Esse fenômeno provoca aumento do atrito entre o feltro e as caixas de sucção, elevando o desgaste do feltro já antigo e aumentando a possibilidade de seu rompimento prematuro

A tendência para se evitar essa ocorrência é a abertura de entradas de "ar falso" no sistema como forma de diminuir a vazão através do feltro, ainda que essa permaneça inalterada na bomba de selo líquido.

Além de não se tratar de um sistema eficiente do ponto de vista energético, ainda podem ocorrer bruscas variações de pressão, de modo a sujeitar o sistema a vibrações.

Considerações de Projetos:

Em projetos nos quais se opta pela concepção de bombas de selo líquido para o serviço de condicionamento de feltro, deve-se atentar para os valores de permeabilidade de feltro em condição nominal.

A consideração da permeabilidade do feltro completamente novo pode ocasionar um superdimensionamento do sistema em casos parciais, mas deve-se evitar o subdimensionamento e a ocorrência do fenômeno de *vacuum tracking*, uma vez que, em condições de valores de vazão acima das especificadas, o sistema não é capaz de suprir as demandas de vácuo, resultando em redução da velocidade da máquina na partida de feltros novos.

Outra opção corresponde a projetar o sistema para um ponto próximo ao nominal, porém realizar a inundação do feltro previamente à sua utilização, reduzindo, assim, sua permeabilidade.

Sopradores de vácuo centrífugos para condicionamento de feltro

Os sopradores de vácuo centrífugos, como já exposto neste trabalho, apresentam uma curva de vácuo suave sob amplas faixas de vazão a operar de maneira econômica e sem variações de rotação ou complexidades de controle.

A curva imposta pela máquina ao sistema se dá como apresentado na Figura 11 (em vermelho):

O comportamento da máquina em carga parcial se dá de maneira extremamente próxima à curva ideal de condicionamento de feltro: à medida que a vazão é reduzida, ocorre leve incremento de pressão ao longo de toda a faixa de vazões operada.

Adicionalmente, pode-se obter a curva ideal de condicionamento

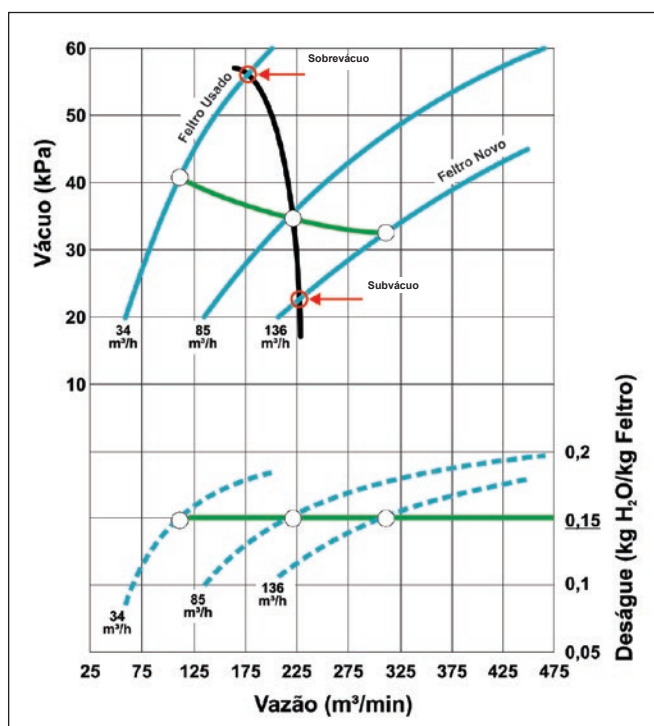


Figura 10: Curva de desempenho de uma bomba de vácuo aplicada ao condicionamento de feltro

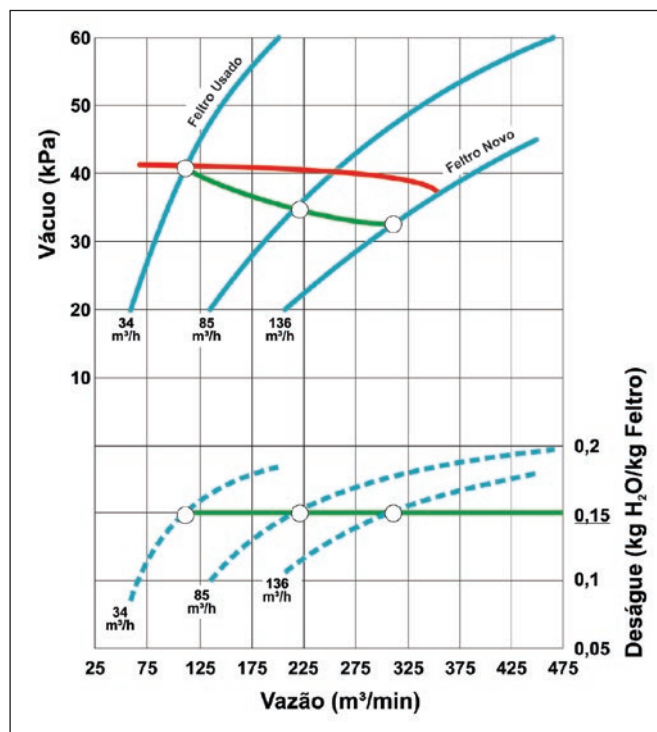


Figura 11: Curva de desempenho de um soprador de vácuo centrífugo aplicada ao condicionamento de feltro

por meio do controle de válvulas no sistema, impondo baixos valores de perda de carga ou de variação da rotação (que, no caso das turbomáquinas, reduz o diferencial de pressão e, conseqüentemente, o nível de vácuo). Comparativamente às bombas, o controle por válvulas de estrangulamento não é possível, uma vez que o aumento da perda de carga no sistema tem como consequência maior nível de vácuo gerado pelas bombas.

Para bombas de vácuo, a redução de rotação não altera o nível de vácuo, influenciando apenas a vazão, embora também não seja adotada devido à complexidade de controle de vazões na linha e à variação de rotação de diversos equipamentos.

Para o sistema de sopradores de vácuo, além de se tratar notoriamente de menos equipamentos, o que viabiliza a aplicação de variação de rotações (não obrigatória), não há necessidade de controle de vazão, já que, devido ao seu princípio dinâmico e à ausência de

câmaras de compressão, a vazão se adapta automaticamente à demanda do sistema.

Devido ao seu princípio operacional distinto, para adoção da tecnologia de sopradores centrífugos em serviços de condicionamento de feltro, não ocorrem os fenômenos de *vacuum tracking* (subvácuo) nem os de sobrevácuo, provocando redução da vida útil do feltro. Os parâmetros de projeto devem ser dimensionados da seguinte maneira:

- nível de vácuo máximo: considerando o requerimento de vácuo do feltro usado;
- vazão máxima: considerando a vazão máxima requerida para um feltro novo.

Estas considerações não geram superdimensionamento do sistema, devido à redução de consumo energético apresentada pela máquina em cargas parciais.

CONCLUSÕES

Para selecionar a tecnologia de sistema de vácuo mais adequada à aplicação em papel e celulose, é essencial o entendimento do princípio de funcionamento do equipamento, assim como suas principais características operacionais.

Tal entendimento, aliado ao conhecimento dos requisitos do sistema ao qual irá operar e suas premissas de projeto, torna possível a especificação ideal do equipamento, buscando-se os melhores níveis de eficiência e flexibilidade operacional.

Após a discussão das principais condições de contorno para o serviço de condicionamento de feltro, assim como casos operacionais ao longo de sua vida útil, pode-se observar a superioridade da aplicação de vácuo por meio de sopradores centrífugos para condicionamento de feltro em relação às bombas de selo líquido.

Adicionalmente, puderam ser discutidas neste trabalho, para ambos os equipamentos, as premissas de *design*, garantindo-se a flexibilidade necessária à operação e buscando-se evitar super ou subdimensionamentos em ambas as tecnologias.

Assim, o trabalho pode apresentar em detalhes as razões da existência de uma solução energeticamente mais eficiente para condicionamento de feltro, assim como explicar suas principais características de projeto.

Espera-se, com este trabalho, contribuir para o aumento da eficiência das plantas de papel e celulose com a aplicação de tecnologias mais eficientes. ■

REFERÊNCIAS

1. *The Paper Making Process – From wood to coated paper*, Sappi Idea Exchange, Brochure, <http://www.na.sappi.com/documents/10165/13508/The+Papermaking+Process.pdf>, acesso em: 06 abr. 2015.
2. Ghosh, A. K. *Fundamentals of Paper Drying – Theory and Application from Industrial Perspective*, Evaporation, Condensation and Heat Transfer, InTechOpen, pp. 535-582. 2011.
3. Oliveira, E. L. O. *Condicionamento de Feltros Nas Máquinas de Papel*, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brazil. 2002.
4. De Crosta, E. F. *Air flow requirements for conditioning press felts at suction pipes*. TAPPI, Vol. 63, n.º 5. 1980.
5. Bloch, H.P. *A Practical Guide for Compressor Technology*, 2.ª Ed. 2006.