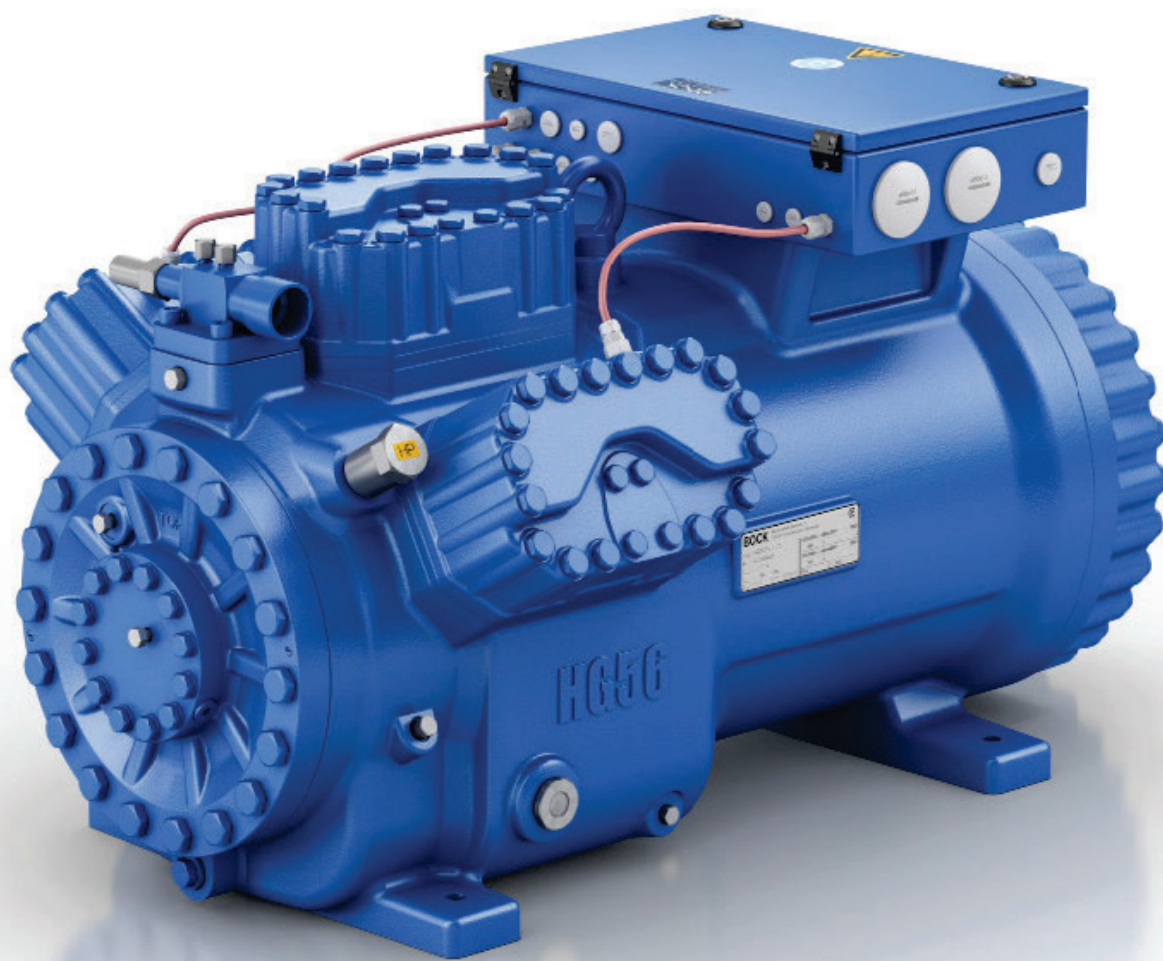


O compressor Danfoss BOCK® CO₂ reduz a vibração **para um desempenho ideal em refrigeração transcritica de supermercados**





Os testes mostram uma redução média de 83% na vibração para otimizar energia, desempenho e confiabilidade.

Um desafio operacional em um supermercado do meio-oeste americano

Está bem estabelecido que os sistemas de CO₂ transcrito oferecem vantagens atraentes para a refrigeração de supermercados — incluindo economia de energia significativa, baixo custo de refrigeração e sustentabilidade ambiental que evita a eliminação gradual de refrigerantes.

Sistemas transcritos que utilizam CO₂ oferecem potencialmente coeficientes de desempenho superiores, maior capacidade de refrigeração volumétrica e economia de energia de 20% ou mais — e até superiores — em climas mais quentes, quando comparados aos HFCs. Além disso, o CO₂ oferece uma solução à prova de futuro que evita a eliminação gradual de refrigerantes graças a um potencial de destruição da camada de ozônio (ODP) zero e um potencial de aquecimento global (GWP) de 1,0. E como um refrigerante natural e econômico, o CO₂ resolve o que a Agência de Proteção Ambiental (EPA) estima ser uma perda média anual de 25% da carga de refrigerante, o que poderia custar a um supermercado US\$ 15.000 para reposição a cada ano.

Mas também é sabido que, ao oferecer esses benefícios, os sistemas de CO₂ transcrito também apresentam desafios técnicos únicos, como altas pressões de operação, complexidade de controle e problemas de confiabilidade dos componentes.

Este relatório técnico discute testes recentes de compressores de CO₂ Danfoss BOCK® em uma instalação de retrofit em Ohio, onde se encontrava um dos desafios mais persistentes em termos de confiabilidade de compressores de CO₂: a vibração. Os resultados dos testes mostram que a solução da Danfoss proporcionou um desempenho significativamente mais suave e silencioso, promovendo a confiabilidade e a eficiência do sistema. Essa solução pode ser aplicada a praticamente qualquer sistema de refrigeração de supermercado com CO₂ transcrito operando em climas quentes.

Vibração: Causas and consequências

Quando as causas e consequências da vibração em compressores de CO₂ são compreendidas, torna-se evidente o valor de utilizar um projeto de compressor avançado.

Em geral, dois tipos de vibração estão associados a compressores alternativos:

1) vibração de torção ou rotação ao longo do virabrequim, que ocorre na mesma frequência da velocidade do virabrequim, e 2) vibração lateral transmitida do sistema através da tubulação, que se harmoniza com a frequência de vibração na estrutura da tubulação. Quando as frequências ressoam juntas, a vibração é amplificada.

Compressores de dois cilindros são mais propensos à vibração. As forças inerciais desequilibradas durante o movimento rotacional são mais acentuadas em compressores de dois cilindros devido a haver menos e maiores componentes móveis. Sob condições de alta pressão, os cursos de potência em compressores de dois cilindros podem produzir vibração significativa devido às flutuações de pressão de baixa frequência e desequilíbrios. Em contraste, compressores de quatro cilindros com mais componentes e maior área de cilindro distribuem as forças de maneira mais uniforme ao longo do virabrequim, reduzindo os efeitos do desequilíbrio.

Frequências específicas do inversor de frequência (VFD) no compressor principal também podem causar vibrações elevadas. Um operador pode tentar amenizar a situação evitando a frequência problemática.

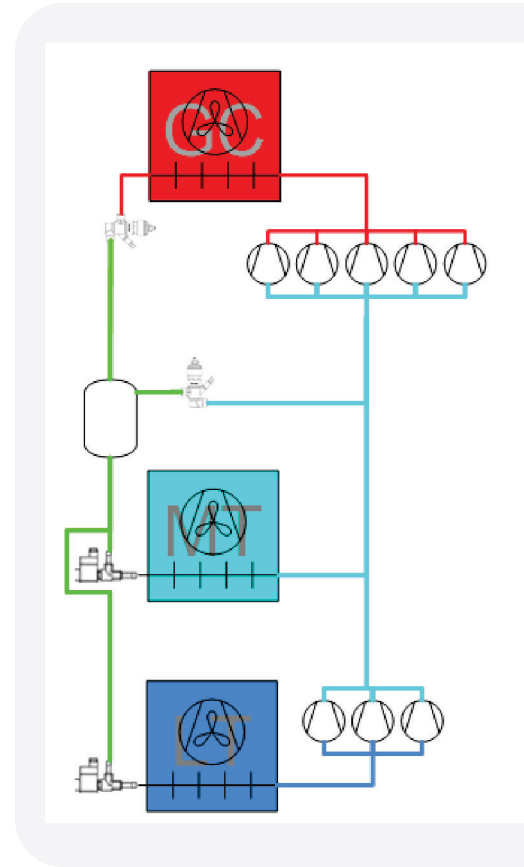
No entanto, essa tática reduzirá a faixa de capacidade operacional do compressor.

Lidar com compressão de alta pressão é fundamental para a capacidade de um compressor de CO₂ de mitigar vibrações.

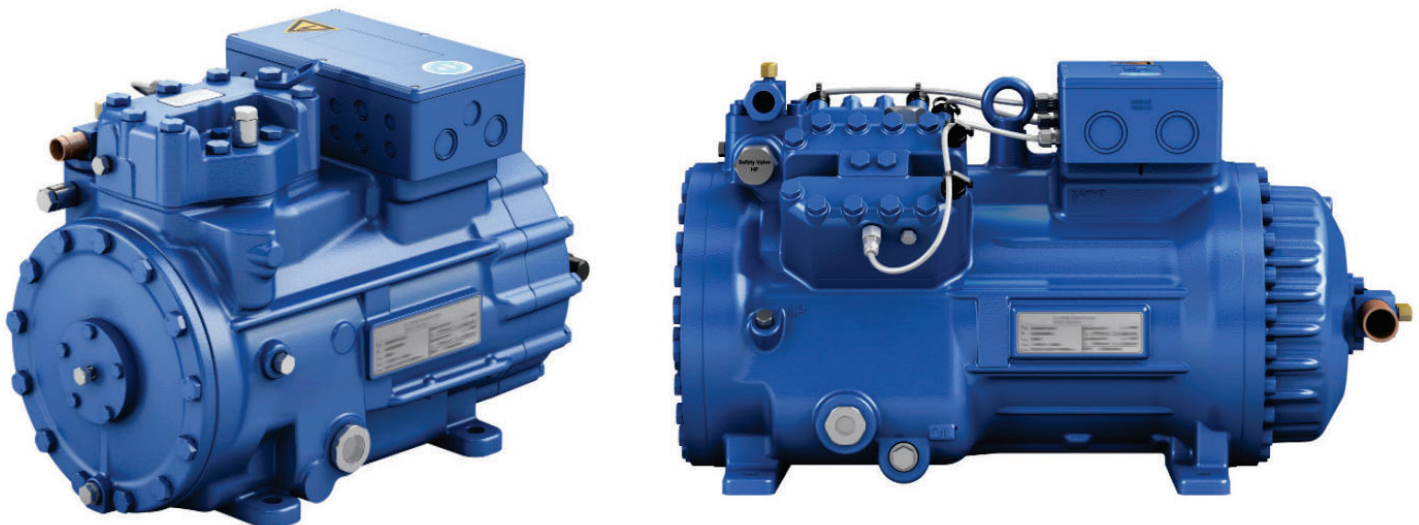
Em ciclos de resfriamento subcrítico, o CO₂ passa por uma fase de compressão gasosa e uma fase de condensação líquida abaixo da temperatura e pressão críticas de 31 °C (87 °F) e 73 bar (1.069 psia), respectivamente.

Em ciclos transcíticos, o CO₂ permanece um fluido “supercrítico” que não sofre mudança de fase de gás para líquido no resfriador de gás. Acima do ponto crítico, as pressões de descarga podem exceder 90 bar (1.303 psi). Um sistema de reforço também é empregado, com fluido de alta pressão descarregado do compressor de baixa temperatura para o lado de sucção do compressor de média temperatura do segundo estágio. Em um sistema transcítico, o resfriador de gás resfria constantemente o fluido supercrítico para evitar seu superaquecimento. Válvulas de expansão de alta pressão avançadas controlam a entrada de fluido no evaporador. Como os sistemas transcíticos podem operar em climas quentes, eles são considerados a solução ideal de refrigeração com CO₂ para aplicações em supermercados. Consequentemente, esse projeto de sistema foi utilizado no caso de teste descrito abaixo.

As condições de alta pressão de fluidos supercríticos de alta densidade representam os maiores desafios para os compressores de CO₂.



↑ A Figura 1 ilustra o projeto básico de um sistema booster transcítico — o projeto de sistema usado no teste de vibração do compressor de CO₂ Danfoss BOCK.



↑ A Figura 2 mostra (à esquerda) um dos três compressores semi-herméticos subcríticos Danfoss BOCK HGX22e/130 S 6 CO₂ adaptados ao grupo de sucção de baixa temperatura (LT) e (à direita) um dos quatro compressores semi-herméticos transcíticos HGX34/230 S 35 CO₂ adaptados ao grupo de sucção de temperatura média (MT).



← A Figura 3 mostra a estrutura modernizada com três compressores Danfoss BOCK no grupo de sucção de baixa temperatura (BT) (acima) e quatro no grupo de média temperatura (MT), instalados com o devido reforço. O inversor de frequência (à esquerda) define as frequências específicas citadas nos gráficos correspondentes.

Operacionalmente, a função principal de um compressor alternativo — a sucção do fluido refrigerante para dentro do cilindro, que é então impulsionado para o lado de descarga em alta pressão em rajadas curtas e rápidas — cria flutuações de pressão e volume dentro dos cilindros e tubulações de conexão.

Com a alta densidade de CO₂ encontrada em ciclos transcíticos, os pulsos de pressão são amplificados. A ressonância acústica de alta amplitude que ocorre, especialmente em baixas frequências, pode ser transmitida através da tubulação, vibrando todo o conjunto do compressor, incluindo a estrutura de suporte. Se a frequência de pulsação entrar em ressonância com as vibrações na tubulação ou nos vasos, essas perturbações podem se tornar extremas. Problemas externos de vibração incluem falhas por fadiga na tubulação e nos componentes estruturais. O carregamento cíclico contínuo causado pelas forças induzidas pela pulsação pode causar fissuras por tensão e quebras. Na sala de equipamentos, pulsações e vibrações altas e descontroladas podem tornar o ambiente operacional muito desconfortável para os funcionários.

Os problemas de vibração encontrados no sistema envolvem grandes diferenças de pressão entre os lados de sucção e descarga, o que pode sobrecarregar as válvulas. Vibrações intensas também podem danificar instrumentos e sistemas de controle, afetando a segurança e a confiabilidade do sistema.

A vibração também afeta a eficiência quando vibrações excessivas e turbulência no fluxo reduzem a eficácia do ciclo de compressão e desperdiçam energia.

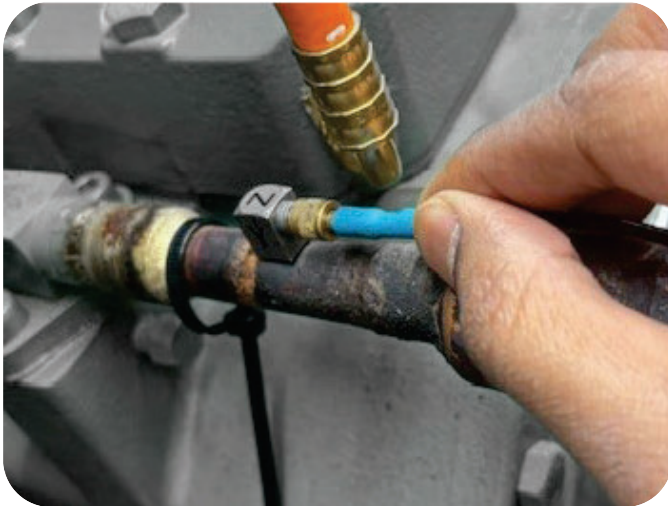
Os compressores Danfoss BOCK CO₂ passam no teste com uma redução média de vibração de 83%

Em resposta aos desafios de vibração enfrentados por compressores alternativos em aplicações transcíticas, a Danfoss realizou testes de campo com compressores semi-herméticos de CO₂ BOCK sob diversas cargas. Os compressores de CO₂ BOCK refrigerados a gás, com certificação UL, são projetados para sistemas de estágio único e em cascata, bem como para sistemas booster em aplicações subcríticas e transcíticas de média e baixa temperatura, conforme testado neste estudo (Figura 1).

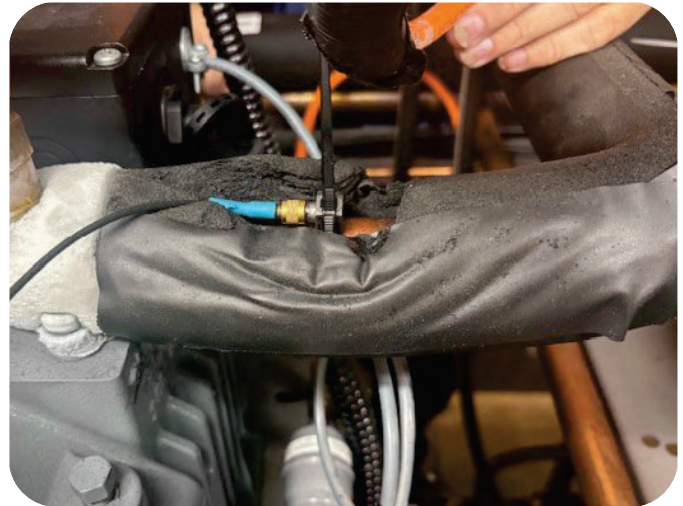
Neste teste, sete compressores Danfoss BOCK da série HGX foram utilizados em um sistema transcrito (Figura 2). Todos os compressores eram semi-herméticos e foram carregados com um óleo refrigerante sintético à base de poliolésteres especiais para uso com R744 em aplicações transcriticas. O rack de refrigeração forneceu um total de 1.121 kBTU/h de capacidade de refrigeração.

O objetivo do projeto era testar os níveis de vibração em um local problemático em um supermercado no estado de Ohio, que apresentava vibração anormal e excessiva do compressor e das estantes. O sistema foi projetado como um sistema booster transcrito com grupos de sucção de baixa temperatura (BT) e média temperatura (MT) em uma única estante, conforme mostrado na Figura 3.

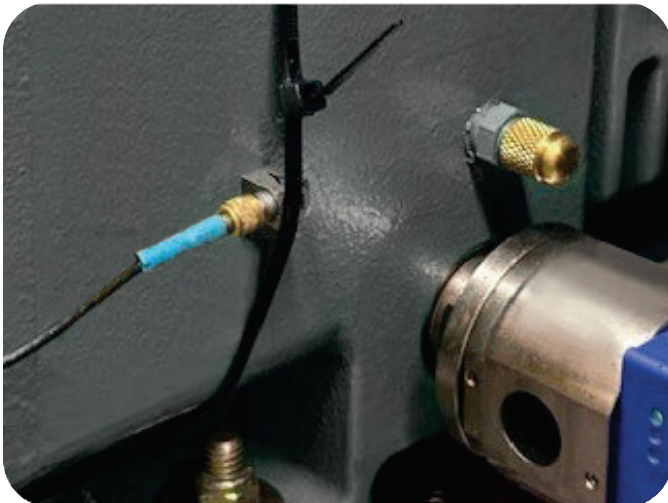
No grupo de sucção de temperatura média, foram selecionados quatro compressores BOCK HGX34 de quatro cilindros. Oferecendo os maiores valores de EER/COP em comparação com produtos concorrentes, o desempenho dos compressores HGX34 foi verificado pela Associação de Fabricantes Europeus de Componentes de Refrigeração (ASERCOM). O desempenho é



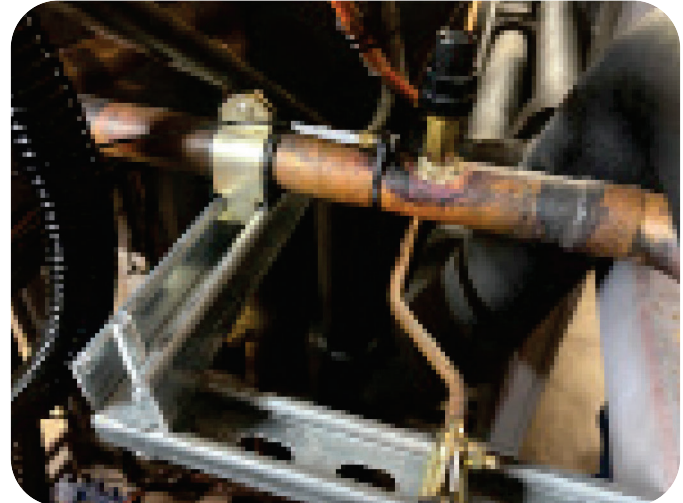
↑ A Figura 4 mostra o ponto de medição da vibração de descarga do compressor LT1 (ver Gráfico 1).



↑ A Figura 5 mostra o ponto de medição da vibração de sucção do compressor LT1 (ver Gráfico 2).



↑ A Figura 6 mostra o ponto de medição da vibração do corpo do compressor LT1 (ver Gráfico 3).



↑ A Figura 7 mostra o ponto de medição da vibração do cabeçote de descarga LT (ver Gráfico 4).

Aprimorados pelo uso de um inversor de frequência (VFD) que opera na faixa de 20 Hz a 70 Hz, os compressores BOCK também incorporam uma bomba de óleo interna com taxa de arraste de óleo inferior a 0,2%, para otimizar a circulação do óleo. A lubrificação contínua da bomba ajuda a reduzir a vibração, em comparação com a lubrificação por salpico tradicional. Projetados para suportar até 100 bar (1450 psi) de pressão em baixa temperatura (LT) e 150 bar (2175 psi) de pressão em média temperatura (MT), os compressores nesta aplicação de teste operaram com pressões de 180 a 220 psi em LT e de 350 a 450 psi em MT.

No grupo de sucção de baixa temperatura, foram utilizados três compressores de dois cilindros BOCK HGX22e.

Os principais componentes do sistema incluíam:

- Grupo de sucção para baixa temperatura (LT): Três dos modelos de dois cilindros HGX22e/130 S
- Grupo de sucção de temperatura média (MT): Quatro dos modelos de quatro cilindros HGX34/230 S35
- Um inversor de frequência configurado em frequências específicas para fins de teste foi aplicado ao compressor principal.
- Refrigerador a gás
- Válvula de Alta Pressão
- Válvula de desvio de gás flash

Faixas típicas de pressão operacional envolvidas:

- Pressão em Baixa Temperatura (BT) (180psi-220psi)
- Pressão de temperatura média (MT) (350 psi - 450 psi)
- Pressão do receptor (490 psi - 600 psi)
- Pressão de descarga/resfriador de gás (700 psi - 1300 psi)

Método de teste e resultados

Configuração de teste

Para fins de comparação, o rack foi adaptado com sete compressores Danfoss BOCK, conforme descrito acima. A área do

rack com os compressores BOCK foi devidamente reforçada, com a tubulação geral e a tubulação de descarga ajustadas de acordo com as melhores práticas.

As medições foram registradas em vários locais no rack e em diversos pontos de compressores individuais e tubulações comuns. As medições foram feitas como deslocamento em três vetores direcionais (X, Y, Z) usando um medidor de vibração calibrado. Como os problemas de vibração foram sentidos principalmente na parte de baixa temperatura (BT) do sistema, as medições se concentraram nessas áreas.

As condições de operação foram variadas utilizando diferentes combinações de liga/desliga do compressor e frequências do compressor principal.

Resultados

Em comparação com os compressores existentes, os compressores Danfoss BOCK HGX alcançaram uma redução significativa de vibração, variando de 48,3% a 97,7% em diferentes pontos e capacidades. A redução média de vibração em todas as combinações de capacidade e vetores de direção foi de 83%. Além disso, o compressor BOCK líder, que utiliza o inversor de frequência (VFD), alcançou uma faixa de frequência mais ampla — de 35 a 70 Hz, em comparação com a faixa de 40 a 60 Hz do compressor original — resultando em uma maior faixa de capacidade no grupo de sucção sem aumento de vibração.

Conforme ilustrado nos cinco gráficos anexos, um conjunto de medições XYZ foi realizado em compressores BOCK e de concorrentes, instalados no mesmo rack, resultando em seis pontos de dados para cada uma das três frequências testadas: 40 Hz, 50 Hz e 60 Hz. Cada gráfico representa as medições de vibração em uma das cinco localizações diferentes: 1) descarga do compressor LT1, 2) sucção do compressor LT1, 3) corpo do compressor LT1, 4) coletor de descarga LT e 5) descarga do compressor LT1 (para todos os compressores).

Gráfico 1

Vibrações de descarga do compressor LT1: original (X1, Y1, Z1) vs. BOCK (X2, Y2, Z2) em microns
 Redução média de vibração em cada direção: X 69,1%, Y 79,5%, Z 48,3%

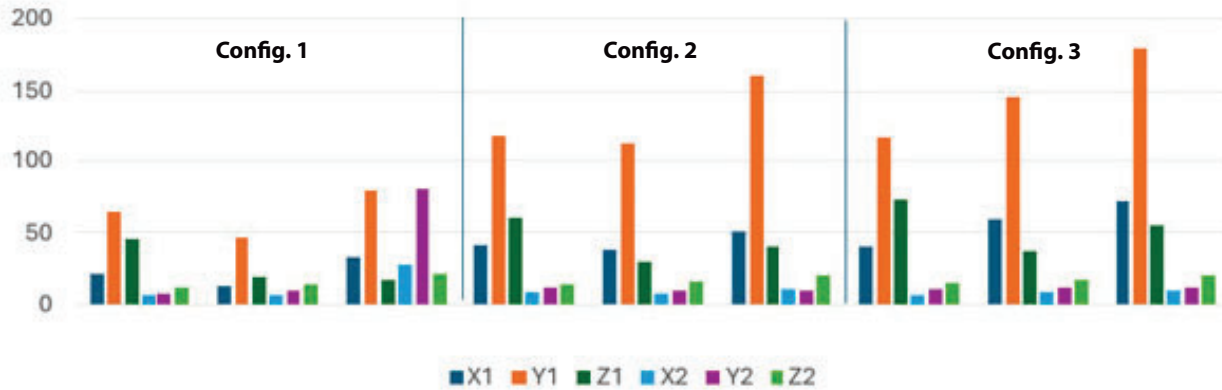


Gráfico 2

Vibrações de sucção do compressor LT1: original (X1, Y1, Z1) vs. BOCK (X2, Y2, Z2) em microns
 Redução média de vibração em cada direção: X 90,9%, Y 71,7%, Z 81,4%

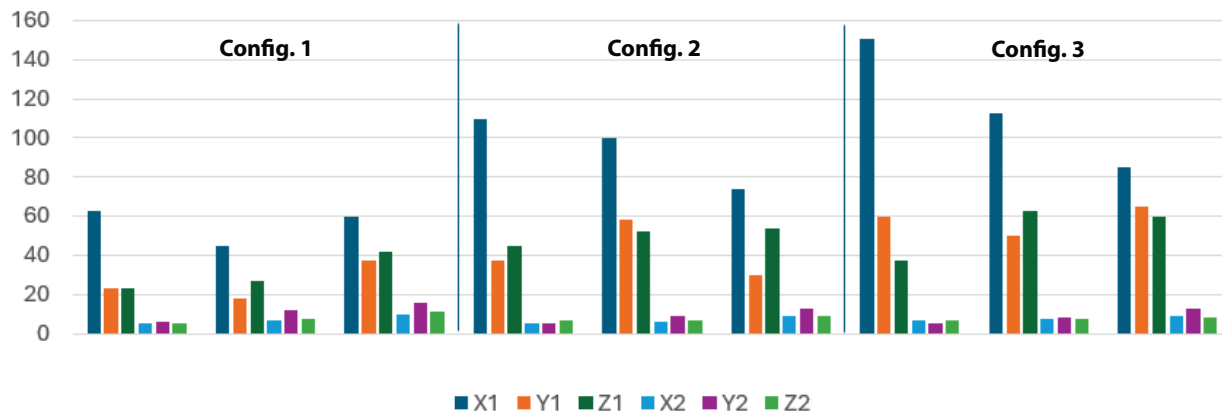


Gráfico 3

Vibrações do corpo do compressor LT1: original (X1, Y1, Z1) vs. BOCK (X2, Y2, Z2) em microns
 Redução média de vibração em cada direção: X 84,7%, Y 90,1%, Z 90,0%

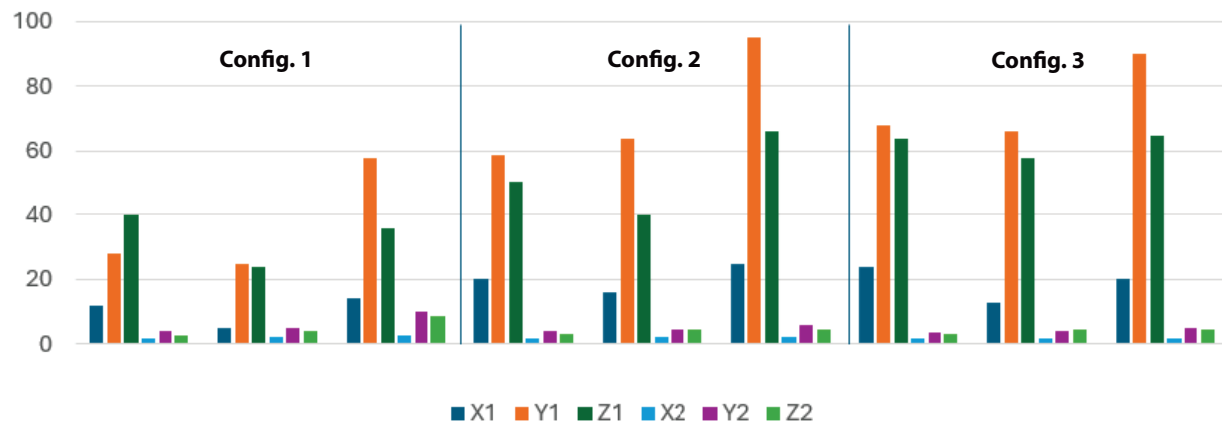


Gráfico 4

Vibrações do cabeçote de descarga LT: original (X1, Y1, Z1) vs. BOCK (X2, Y2, Z2) em microns
 Redução média de vibração em cada direção: X 97,7%, Y 97,6%, Z 97,2%

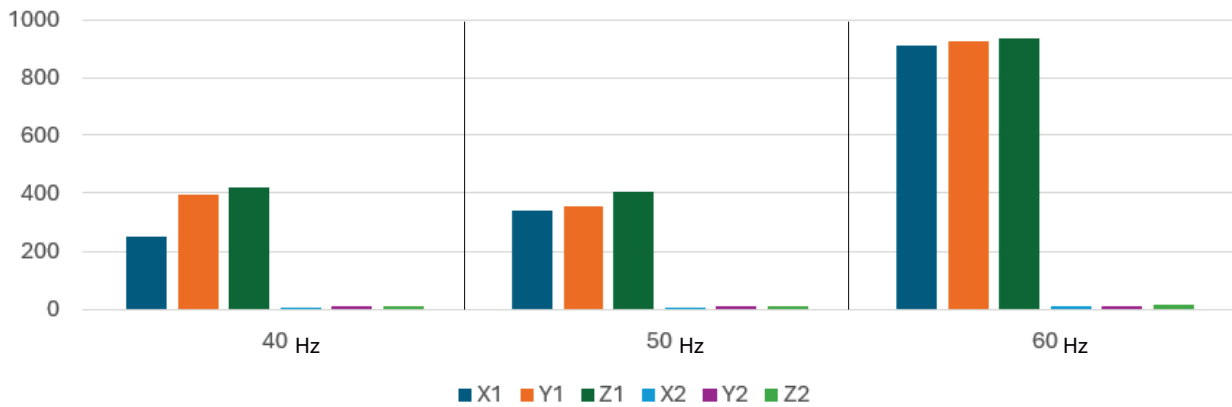
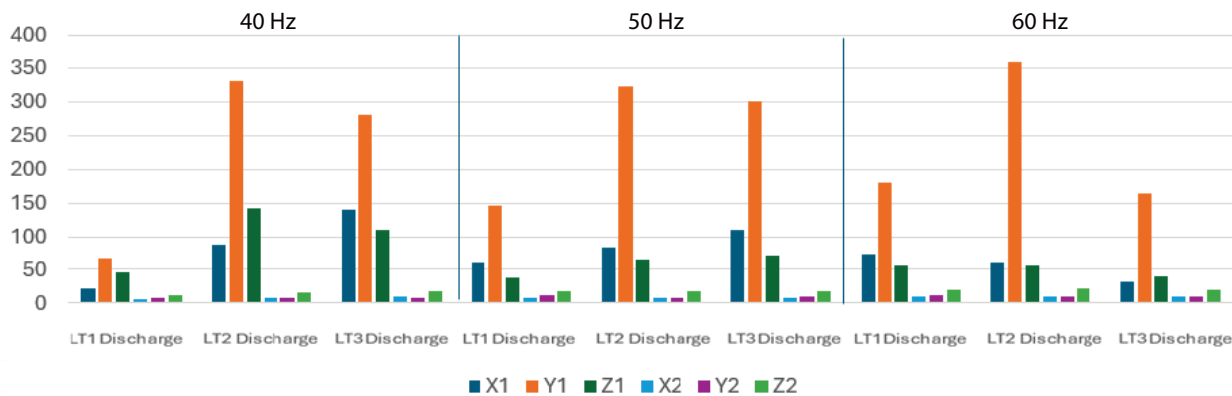


Gráfico 5

Vibrações de descarga do compressor LT: original (X1, Y1, Z1) vs. BOCK (X2, Y2, Z2) em microns
 Redução média de vibração em cada direção: X 84,5%, Y 94,7%, Z 68,9%



Conclusão

Verificar o desempenho estável para uma economia de energia confiável

Além dos testes que comprovaram uma redução média de 83% na vibração, os benefícios subjetivos também foram significativos: menos ruído e menos trepidação das tubulações e outros componentes do rack, o que tornou o ambiente da sala de operação muito mais confortável para a equipe. Os benefícios futuros previstos dos compressores Danfoss BOCK incluem maior segurança, confiabilidade e desempenho, graças à operação estável nas diversas pressões de operação normalmente encontradas em um sistema booster transcrito de R744. Os resultados dos testes indicam que os compressores Danfoss BOCK HGX podem proporcionar a economia de energia e os benefícios ambientais do CO₂ em uma solução confiável para uma ampla gama de instalações de refrigeração de supermercados.

