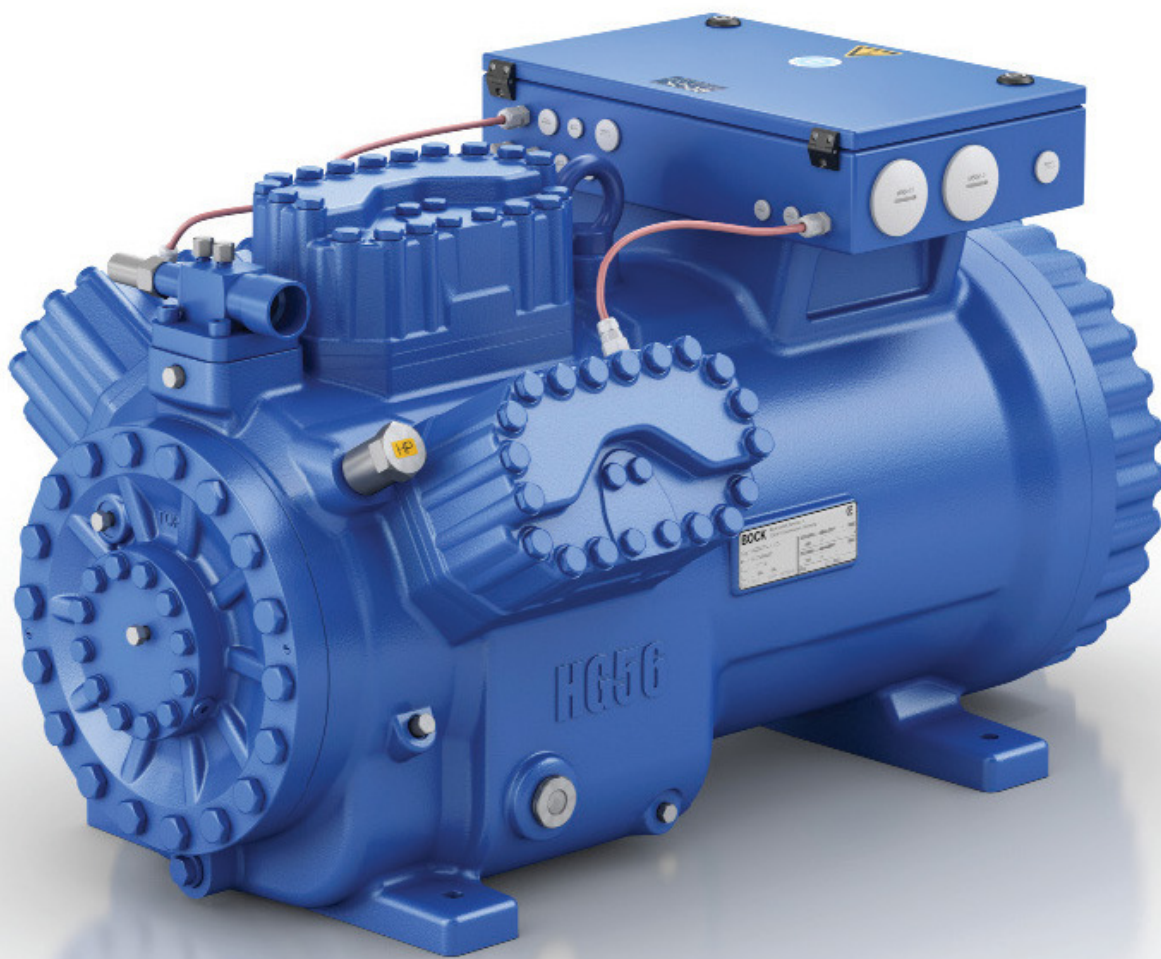


El compresor Danfoss BOCK® CO<sub>2</sub> reduce las vibraciones **para un rendimiento óptimo de la refrigeración transcritical en supermercados.**





Las pruebas muestran una reducción promedio del 83 % en la vibración para optimizar la energía, el rendimiento y la fiabilidad.

## El reto operativo de un supermercado del Medio Oeste:

Está ampliamente demostrado que los sistemas transcíticos de CO<sub>2</sub> ofrecen ventajas convincentes para la refrigeración de supermercados, incluyendo un ahorro energético considerable, un bajo costo de refrigerante y una sostenibilidad medioambiental que evita la eliminación gradual de los refrigerantes.

Los sistemas transcíticos que utilizan CO<sub>2</sub> ofrecen potencialmente coeficientes de rendimiento superiores, una mayor capacidad de refrigeración volumétrica y un ahorro energético de hasta un 20 % — e incluso superior— en comparación con los HFC en climas más cálidos. Además, el CO<sub>2</sub> ofrece una solución preparada para el futuro que evita la eliminación gradual de los refrigerantes gracias a un potencial de agotamiento del ozono (ODP) de cero y un potencial de calentamiento global (GWP) de 1,0. Y como refrigerante natural y económico, el CO<sub>2</sub> aborda lo que la Agencia de Protección Ambiental (EPA) estima que es una pérdida promedio anual del 25% de la carga de refrigerante, lo que podría costar a un supermercado 15.000 dólares al año en sustitución.

Pero también es bien sabido que, al ofrecer esas ventajas, los sistemas transcíticos de CO<sub>2</sub> también plantean retos técnicos únicos, como las altas presiones de operación, la complejidad de los controles y los problemas de fiabilidad de los componentes.

Este informe técnico analiza las pruebas recientes realizadas con compresores Danfoss BOCK® CO<sub>2</sub> en una instalación de modernización en campo en un sitio en Ohio que experimenta uno de los problemas más persistentes en cuanto a la fiabilidad de los compresores de CO<sub>2</sub>: la vibración. Los resultados de las pruebas muestran que la solución de Danfoss proporcionó un rendimiento significativamente más suave y silencioso, favoreciendo la fiabilidad y la eficiencia del sistema, una solución que se puede aplicar a prácticamente cualquier sistema de refrigeración transcítico de CO<sub>2</sub> para supermercados que opere en climas cálidos.

### Vibración: causas y consecuencias

Cuando se comprenden las causas y consecuencias de la vibración en los compresores de CO<sub>2</sub>, el valor de utilizar un diseño avanzado de compresor se hace evidente.

*En general, hay dos tipos de vibraciones asociadas a los compresores alternativos:*

1) vibración torsional o rotacional a lo largo del cigüeñal que ocurre a la misma frecuencia que la velocidad del cigüeñal, y 2) vibración lateral transmitida desde el sistema a través de las tuberías que se armoniza con la frecuencia de vibración en la estructura de las tuberías. Cuando las frecuencias resuenan juntas, la vibración se amplifica.

*Los compresores de dos cilindros son más propensos a las vibraciones.* Las fuerzas inerciales desequilibradas durante el movimiento rotatorio son más pronunciadas en los compresores de dos cilindros debido a que tienen menos componentes móviles y estos son más grandes. En condiciones de alta presión, las carreras de potencia en los compresores de dos cilindros pueden producir vibraciones significativas debido a las fluctuaciones de presión de baja frecuencia y a los desequilibrios. Por el contrario, los compresores de cuatro cilindros, con más componentes y superficie de cilindro, distribuyen las fuerzas de manera más uniforme a lo largo del cigüeñal, lo que reduce los efectos del desequilibrio.

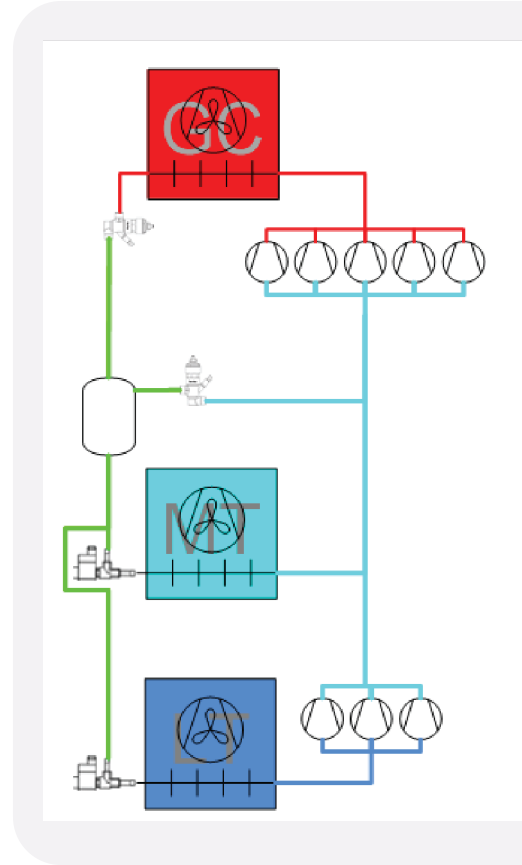
Las frecuencias específicas del variador de frecuencia (VFD) del compresor principal también pueden causar altas vibraciones. El operador puede intentar aliviar la situación omitiendo la frecuencia problemática. Sin embargo, esta táctica reducirá el rango de capacidad funcional del compresor.

El manejo de la compresión a alta presión es fundamental para la capacidad de un compresor de CO<sub>2</sub> de mitigar la vibración.

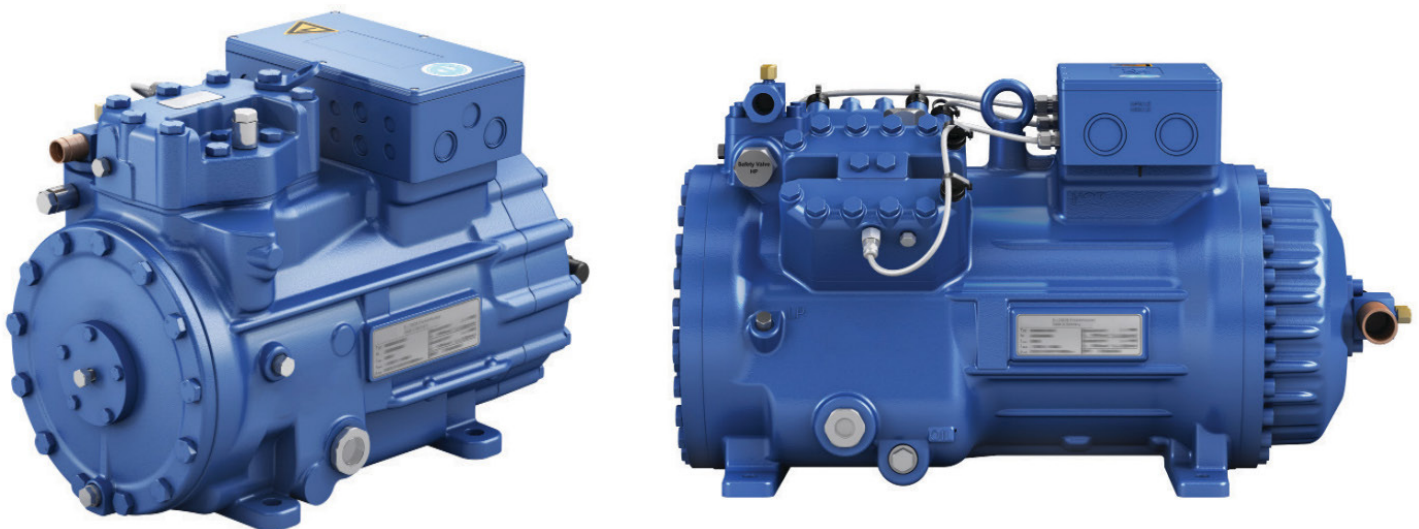
En los ciclos de refrigeración subcríticos, el CO<sub>2</sub> pasa por una fase de compresión de gas y una fase de condensación de líquido por debajo de la temperatura y presión críticas de 31 °C (87 °F) y 73 bar (1069 psia), respectivamente.

En los ciclos transcíticos, el CO<sub>2</sub> sigue siendo un fluido «supercrítico» que no sufre un cambio de fase de gas a líquido en el gas cooler. Por encima del punto crítico, las presiones de descarga pueden superar los 90 bar (1303 psi). También se emplea un sistema booster, en el cual el fluido a alta presión descargado desde el compresor de baja temperatura se dirige al lado de succión del compresor de temperatura media de la segunda etapa. En un sistema transcítico, el gas cooler enfría constantemente el fluido supercrítico para evitar que se sobrecaliente. Las válvulas de expansión avanzadas de alta presión controlan la introducción de fluido en el evaporador. Dado que los sistemas transcíticos pueden operar en climas cálidos, se consideran la solución óptima de refrigeración con CO<sub>2</sub> para aplicaciones en supermercados. En consecuencia, este diseño de sistema se utilizó en el caso de prueba que se describe a continuación.

Las condiciones de alta presión del fluido supercrítico de alta densidad representan los mayores retos para los compresores de CO<sub>2</sub>.



↑ La figura 1 ilustra el diseño básico de un sistema booster transcítico, el diseño del sistema utilizado en el caso de prueba de vibración del compresor de CO<sub>2</sub> de Danfoss BOCK.



↑ La figura 2 muestra (izquierda) uno de los tres compresores semiherméticos subcríticos de CO<sub>2</sub> Danfoss BOCK HGX22e/130 S 6 instalados como retrofit en el grupo de succión de baja temperatura (LT) y (derecha) uno de los cuatro compresores semiherméticos transcíticos de CO<sub>2</sub> HGX34/230 S 35 instalados como retrofit en el grupo de succión de temperatura media (MT).



← La figura 3 muestra el rack modernizado con tres compresores Danfoss BOCK en el grupo de succión de baja temperatura (LT) (arriba) y cuatro en el grupo de temperatura media (MT) instalados con los refuerzos adecuados. El variador de frecuencia (izquierda) establece las frecuencias específicas citadas en los gráficos adjuntos.

Desde el punto de vista operativo, la función principal de un compresor alternativo (la succión de refrigerante en el cilindro, que luego es empujado hacia el lado de descarga a alta presión en ráfagas cortas y rápidas) crea fluctuaciones de presión y volumen dentro de los cilindros y las tuberías de conexión.

Con la alta densidad del CO<sub>2</sub> presente en los ciclos transcíticos, los pulsos de presión se amplifican. La resonancia acústica de alta amplitud que se produce, especialmente a bajas frecuencias, puede transmitirse a través de las tuberías, sacudiendo todo el conjunto del compresor, incluido el bastidor del rack. Si la frecuencia de pulsación entra en resonancia con las vibraciones de las tuberías o los recipientes, estas perturbaciones pueden llegar a ser extremas. Los problemas de vibración externa incluyen fallas por fatiga en las tuberías y los componentes estructurales.

La carga cíclica continua causada por las fuerzas inducidas por las pulsaciones puede provocar grietas por tensión y roturas. En la sala de máquinas, las pulsaciones y vibraciones fuertes e descontroladas pueden hacer que el entorno de trabajo resulte muy incómodo para el personal.

*Los problemas de vibración que se producen en el sistema* implican grandes diferencias de presión entre los lados de succión y descarga que pueden ejercer presión sobre las válvulas. Las vibraciones intensas también pueden dañar los instrumentos y los sistemas de control, lo que afecta a la seguridad y fiabilidad del sistema.

*La vibración también afecta a la eficiencia* cuando una vibración excesiva y la turbulencia del flujo reducen la eficacia del ciclo de compresión y desperdician energía.

**Los compresores de CO<sub>2</sub> de Danfoss BOCK superan la prueba con una reducción promedio de vibraciones del 83%.**

En respuesta a los retos de vibración a los que se enfrentan los compresores alternativos en aplicaciones transcíticas, Danfoss realizó pruebas en campo de los compresores semierméticos de CO<sub>2</sub> de BOCK® con diversas cargas. Los compresores BOCK® de CO<sub>2</sub> refrigerados por gas, que cuentan con la certificación UL, están diseñados para sistemas de una sola etapa y en cascada, así como para sistemas booster en aplicaciones subcríticas y transcíticas de temperatura media y baja, tal y como se ha probado aquí (Figura 1).

En este caso de prueba, se emplearon siete compresores Danfoss BOCK serie HGX en un sistema transcrito (Figura 2). Todos los compresores eran semiherméticos y estaban cargados con un aceite sintético para refrigeración a base de poliolesteres especiales para su uso con R744 en aplicaciones transcricas. El rack de refrigeración suministró un total de 1121 kBTUh de refrigeración.

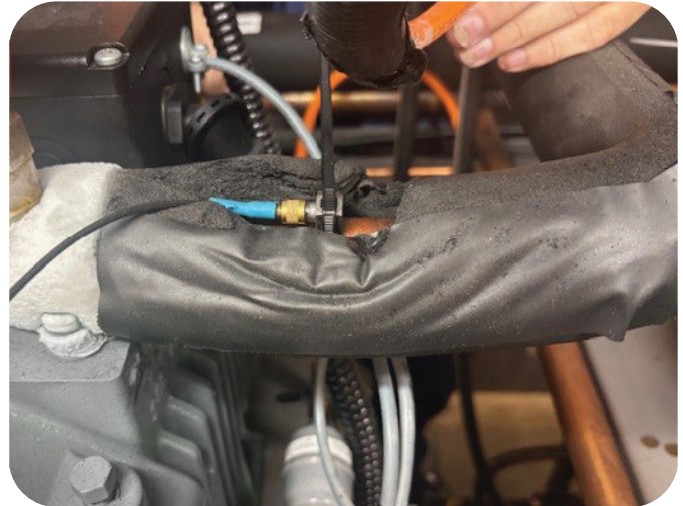
*El objetivo del proyecto era comprobar los niveles de vibración en un sitio problemático de un supermercado de Ohio que experimentaba vibraciones anormales y excesivas en el compresor y el rack.*

El sistema se diseñó como un sistema booster transcrito con grupos de succión de baja temperatura (LT) y temperatura media (MT) en un rack, como se muestra en la figura 3.

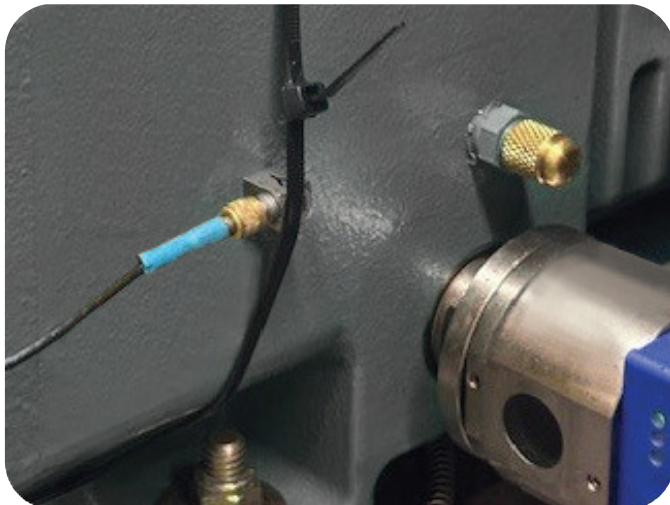
*En el grupo de succión de temperatura media, se seleccionaron cuatro compresores BOCK HGX34 de cuatro cilindros. Con los valores EER/COP más altos en comparación con los productos de la competencia, el rendimiento de los compresores HGX34 ha sido verificado por la Asociación Europea de Fabricantes de Componentes de Refrigeración (ASERCOM). El rendimiento es*



↑ La Figura 4 muestra el punto de medición de la vibración de descarga del compresor LT1 (véase el Gráfico 1).



↑ La Figura 5 muestra el punto de medición de la vibración de succión del compresor LT1 (véase el Gráfico 2).



↑ La Figura 6 muestra el punto de medición de la vibración del cuerpo del compresor LT1 (véase el gráfico 3).



↑ La Figura 7 muestra el punto de medición de la vibración del cabezal de descarga LT (véase el Gráfico 4).

mejorado mediante el uso de un variador de frecuencia (VFD) que puede operar en un rango de 20 Hz a 70 Hz. Los compresores BOCK también incorporan una bomba de aceite interna con una tasa de arrastre de aceite inferior al 0,2 % para una circulación óptima del aceite. La lubricación continua de la bomba ayuda a reducir la vibración, en comparación con la lubricación por salpicadura tradicional. Diseñados para soportar hasta 100 bar (1450 psi) de presión a baja temperatura (LT) y 150 bar (2175 psi) de presión a temperatura media (MT), los compresores de esta aplicación de prueba operaron a presiones de 180 a 220 psi en LT y de 350 a 450 psi en MT.

*En el grupo de succión a baja temperatura, se emplearon tres compresores BOCK HGX22e de dos cilindros.*

*Los componentes principales del sistema incluían:*

- Grupo de succión de baja temperatura (LT): Tres del modelo de dos cilindros HGX22e/130 S6
- Grupo de succión de temperatura media (MT): Cuatro del modelo de cuatro cilindros HGX34/230 S35
- Se aplicó un variador de frecuencia configurado a frecuencias específicas con fines de prueba al compresor principal.
- Gas
- Válvula de alta presión
- Válvula de derivación de gas flash

*Rangos típicos de presión de funcionamiento utilizados:*

- Presión de baja temperatura (LT) (180 psi-220 psi)
- Presión de temperatura media (MT) (350 psi-450 psi)
- Presión del tanque (490 psi-600 psi)
- Presión de descarga/gas cooler (700 psi-1300 psi)

## Método de prueba y resultados

### Configuración de prueba

A efectos comparativos, el rack se reacondicionó con siete compresores Danfoss BOCK descritos anteriormente. El área del rack con los compresores BOCK se reforzó adecu-

adamente con tuberías generales y tuberías de descarga ajustadas según las mejores prácticas.

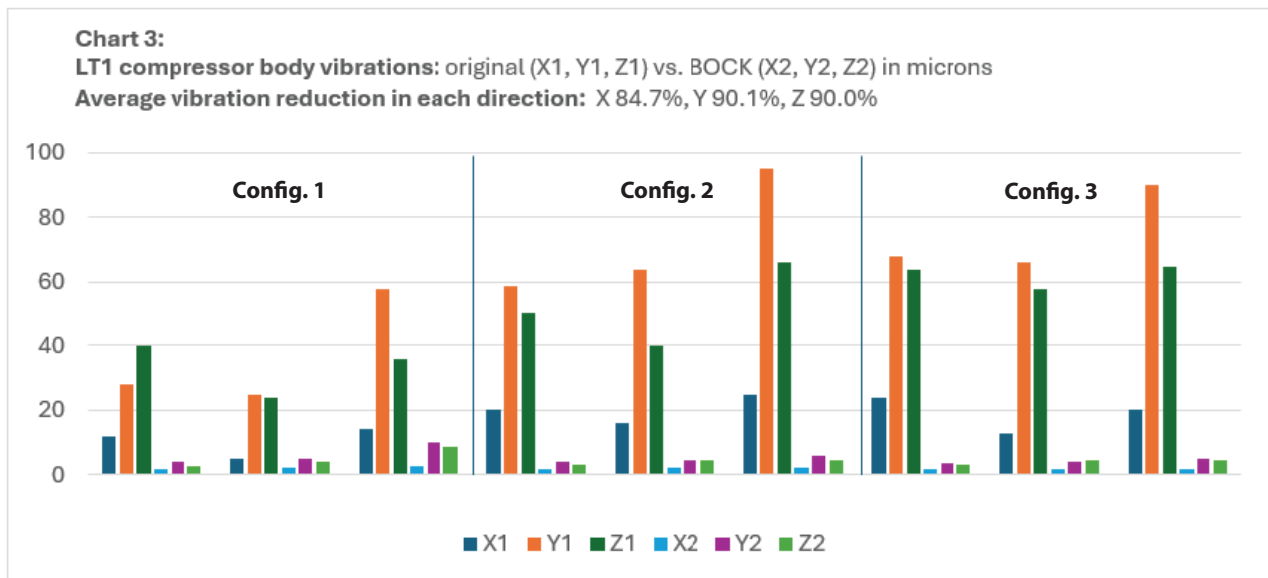
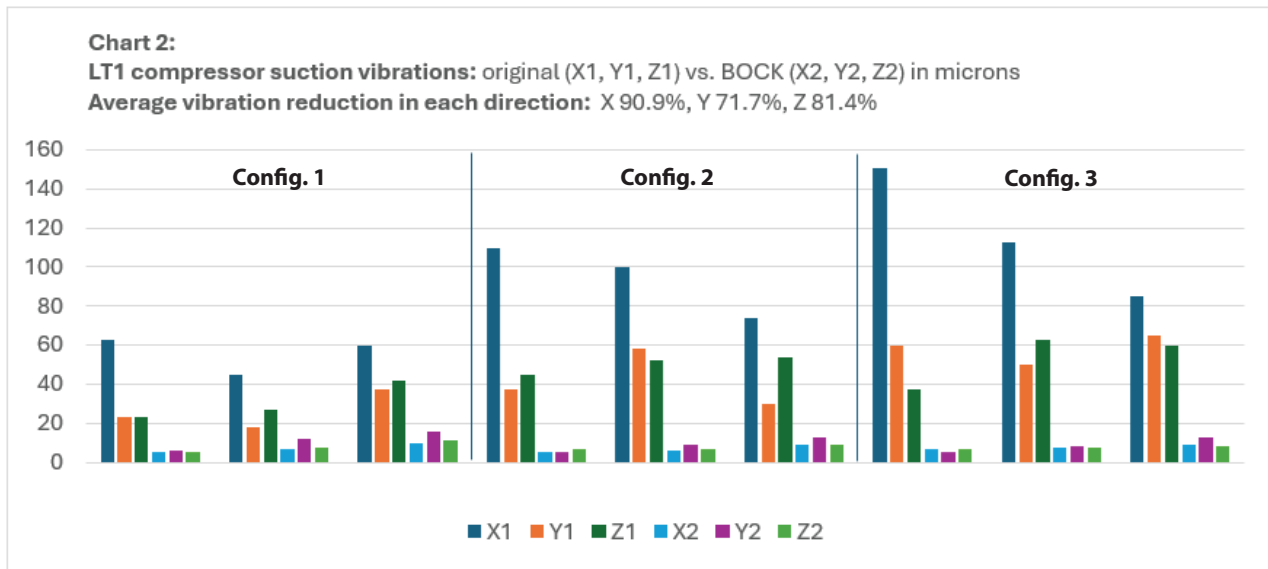
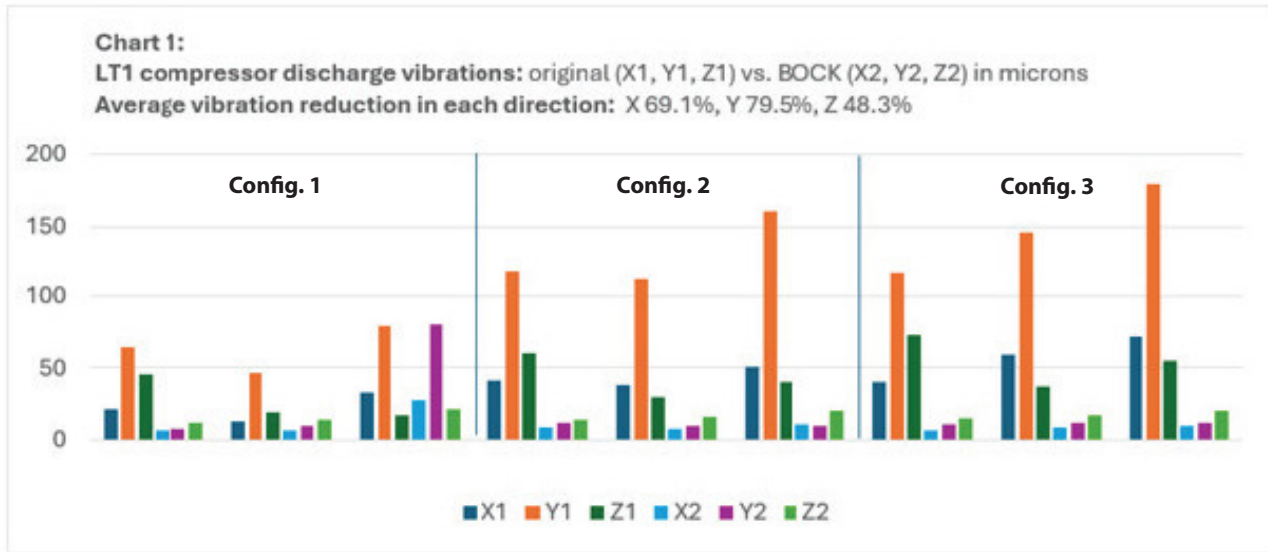
Las mediciones se tomaron en múltiples ubicaciones del rack y en varios puntos de los compresores individuales y las líneas de tuberías comunes. Las mediciones se tomaron como desplazamiento en tres vectores direccionales (X, Y, Z) utilizando un medidor de vibraciones calibrado. Dado que los problemas de vibración se experimentaban principalmente en la parte de baja temperatura (LT) del sistema, las mediciones se centraron en estas áreas.

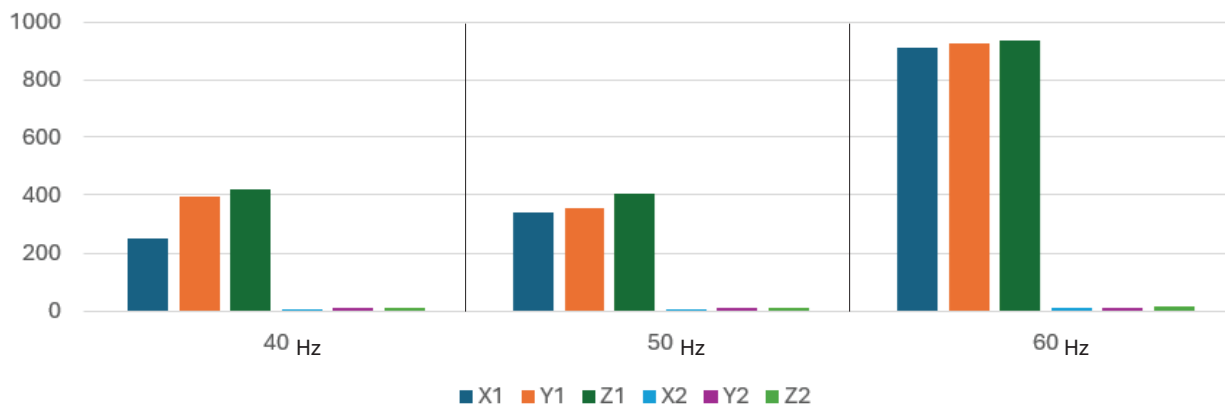
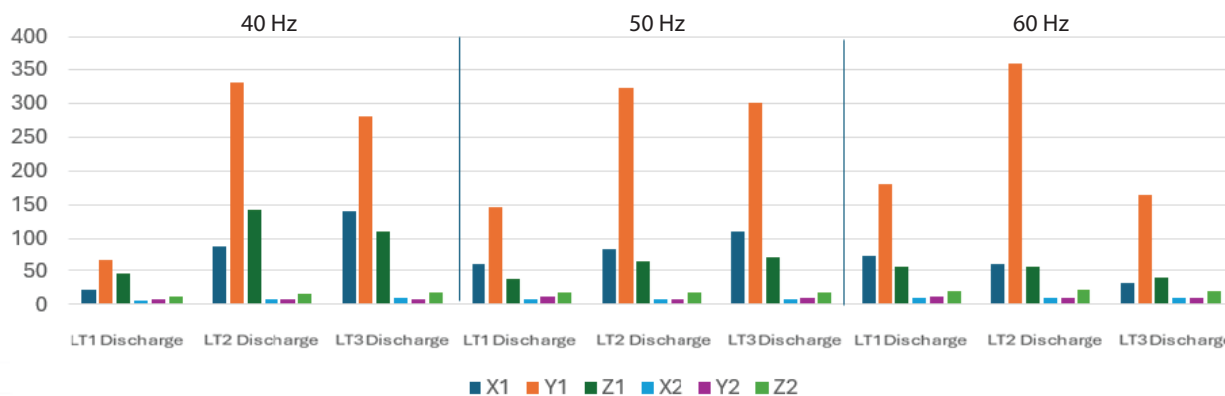
Las condiciones de operación se variaron utilizando diferentes combinaciones de encendido/apagado del compresor y frecuencias del compresor principal.

### Resultados

En comparación con los compresores existentes, los compresores Danfoss BOCK HGX lograron una reducción significativa de las vibraciones, que osciló entre el 48,3 % y el 97,7 % en diversos puntos y capacidades. La reducción promedio de las vibraciones en todas las combinaciones de capacidad y vectores de dirección fue del 83 %. Además, el compresor principal BOCK que emplea el VFD logró un rango de frecuencia más amplio, de 35 a 70 Hz en comparación con el rango de 40 a 60 Hz del compresor original, lo que dio como resultado un rango de capacidad mayor en el grupo de succión sin vibraciones adicionales.

Como se muestra en los cinco gráficos adjuntos, se tomó un conjunto de mediciones XYZ en compresores BOCK y de la competencia instalados en el mismo rack, lo que dio como resultado seis puntos de datos para cada una de las tres frecuencias probadas: 40 Hz, 50 Hz y 60 Hz. Cada gráfico representa las mediciones de vibración en una de las cinco ubicaciones diferentes: 1) descarga del compresor LT1, 2) succión del compresor LT1, 3) cuerpo del compresor LT1, 4) cabezal de descarga LT y 5) descarga del compresor LT para todos los compresores.



**Chart 4:****LT discharge header vibrations: original (X1, Y1, Z1) vs. BOCK (X2, Y2, Z2) in microns****Average vibration reduction in each direction: X 97.7%, Y 97.6%, Z 97.2%****Chart 5:****LT compressor discharge vibrations: original (X1, Y1, Z1) vs. BOCK (X2, Y2, Z2) in microns****Average vibration reduction in each direction: X 84.5%, Y 94.7%, Z 68.9%**

### Conclusión

#### Verificación del rendimiento estable para un ahorro energético fiable.

Además de las pruebas que verificaron una reducción promedio del 83 % en las vibraciones, las ventajas subjetivas también fueron significativas: menos ruido y menos sacudidas en las tuberías y otros componentes del rack, lo que hizo que el entorno de la sala de operaciones fuera mucho más cómodo para el personal. Entre las ventajas futuras previstas de los compresores Danfoss BOCK se incluyen una mayor seguridad, fiabilidad y rendimiento gracias al funcionamiento estable en las distintas presiones de operación que suelen darse en un sistema booster transcrito R744.

Los resultados de las pruebas indican que los compresores Danfoss BOCK HGX pueden ofrecer el ahorro energético y las ventajas medioambientales del CO<sub>2</sub> en una solución fiable para una amplia gama de instalaciones de refrigeración de supermercados.

Danfoss

Danfoss.us  
1-888-DANFOSS

E-mail: [DanfossNorthAmerica@danfoss.com](mailto:DanfossNorthAmerica@danfoss.com)

Cualquier información, incluida, entre otras cosas, la información sobre la selección del producto, su aplicación o uso, el diseño del producto, el peso, las dimensiones, la capacidad o cualquier otro dato técnico que figure en los manuales de los productos, las descripciones de los catálogos, los anuncios, etc., ya sea que se facilite por escrito, oralmente, por medios electrónicos, en línea o mediante descarga, se considerará informativa y solo será vinculante si se hace referencia explícita a ella en un presupuesto o en la confirmación del pedido. Danfoss no se hace responsable de los posibles errores en catálogos, folletos, videos y otros materiales.

Danfoss se reserva el derecho de modificar sus productos sin previo aviso. Esto también se aplica a los productos solicitados pero no entregados, siempre que dichas modificaciones no supongan cambios en la forma, el tamaño o la función del producto. Todas las marcas comerciales que aparecen en este material son propiedad de Danfoss A/S o de las empresas del grupo Danfoss. Danfoss y el logotipo de Danfoss son marcas comerciales de Danfoss A/S. Todos los derechos reservados.4

© Danfoss 2025

AE544874791440en-010101