

# SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN COMERCIAL CON CO<sub>2</sub>

## VISIÓN GLOBAL DE LAS CAPACIDADES DE DESARROLLO Y PRUEBAS



El grupo de investigadores constituido por Tobías SIENEL, en calidad de Ingeniero Director, y Oliver FINCKH (MSME, MSMGMT), en calidad de RD&E Manager, Refrigeration Systems & Controls, TR, pertenecientes ambos a Carrier Kältetechnik Deutschland GmbH (Mainz-Kostheim, Alemania), tratan en el presente documento acerca de las posibilidades de desarrollo, con las correspondientes pruebas, de los sistemas de refrigeración comercial con dióxido de carbono como refrigerante. Dicho trabajo ha sido recogido en un documento bajo el título: “AN OVERVIEW OF DEVELOPMENT AND TEST CAPABILITIES FOR CO<sub>2</sub> COMMERCIAL REFRIGERATION SYSTEMS”<sup>(\*)</sup>, que fue presentado por sus autores como ponencia con motivo del evento “9th-IIF/IIR Gustav Lorentzen Conference: natural refrigerants: real alternatives”<sup>(\*\*)</sup>, celebrado en el Centro de Exposiciones y Conferencias de Sidney (2010).

### SINOPSIS

Durante la pasada década ha existido una creciente demanda en el mercado de sistemas de refrigeración destinados a supermercados con refrigerantes de muy bajo impacto medioambiental. Una solución que ha captado mucha atención ha sido el uso del dióxido de carbono en expansión directa, tanto en aplicaciones de baja temperatura como de media. Ya que estos sistemas requieren presiones muchas más elevadas que los sistemas convencionales, se necesitan componentes completamente nuevos. El desarrollo y cualificación de estos componentes requiere de nuevas capacidades a implantar in situ, con el fin de asegurar la fiabilidad del sistema, la disponibilidad, y el funcionamiento durante su período de vida, que son críticas en cuanto a la aceptación a largo plazo de estos nuevos sistemas. Además de estos factores, las diferencias de coste entre los sistemas tradicionales y los sistemas de CO<sub>2</sub> a alta presión han requerido que se produzca naturalmente una migración de los componentes para estos sistemas desde el sector industrial al más comercial. En el presente documento se tratará de las instalaciones implantadas en Mainz, Alemania, como una parte crucial del desarrollo de una gama de sistemas de refrigeración comercial con CO<sub>2</sub>. Estas instalaciones incluyen pruebas de referencia y cualificación del compresor, evaluación del enfriador de gas, desarrollo del armario para el evaporador y pantalla de visualización y optimización de costes, validación y cualificación de las prestaciones de la válvula, y validación de todo el sistema y de los controles. Se tratará a continuación el uso de estas instalaciones así como algunas lecciones aprendidas como parte de su funcionamiento.

### 1. INTRODUCCIÓN

A largo plazo, llegará a ser una realidad la amplia aceptación por parte del mercado de sistemas con CO<sub>2</sub> cuando estén disponibles componentes fiables, rentables y de alta eficiencia. Ya que muchos de estos componentes se encuentran actualmente en fase desarrollo, se han construido una serie de instalaciones para pruebas en el Centro Director de Diseño de Carrier Commercial Refrigeration en Mainz, Alemania, con el fin de obtener referencias, cualificar, aumentar el rendimiento y optimizar los costes de los componentes para CO<sub>2</sub> y finalmente los sistemas para CO<sub>2</sub>. Estas instalaciones se han construido entorno al concepto utilizado en los sistemas de Refrigeración Comercial de Temperatura Media (MT) de Carrier.

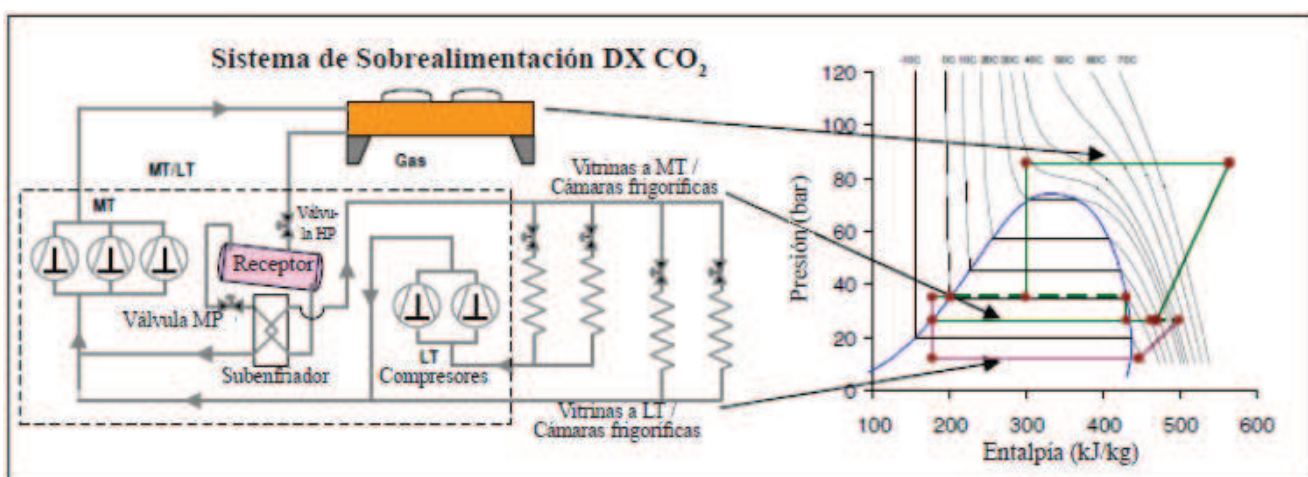


Figura 1a

Figura 1b

En las Figuras 1a y 1b se muestra el diseño básico del sistema de un sistema de sobrealimentación con CO<sub>2</sub> transcrito, junto con la representación termodinámica. Los compresores a MT se conectan y desconectan con el fin de mantener la presión deseada en succión. Un compresor en la batería funciona siempre a velocidad variable a fin de mantener el control preciso. Debido a este control preciso, la temperatura de evaporación en el sistema puede subirse sin comprometer la seguridad de los alimentos, lo que permite una mayor eficiencia. La descarga de los compresores llega al enfriador de gas,

que enfría el CO<sub>2</sub> hasta un estado de baja entalpía antes de entrar a la válvula de alta presión (HPV). La HPV controla la presión dentro de la parte de alta presión del sistema, así como prepara la separación de la parte de presión media del sistema. Después de la HPV, el CO<sub>2</sub> fluye dentro del receptor, que actúa también como un separador de fase en este sistema. El vapor que sale del receptor se estrangula mediante la válvula de media presión (MPV) hasta la presión de succión a MT, que controla efectivamente la presión en el receptor. Después de la expansión hasta la presión de succión, el vapor del CO<sub>2</sub> entra la región de la fase 2. Con el fin de evitar el envío de este líquido a los compresores, el CO<sub>2</sub> que sale de la MPV subenfria el caudal de líquido que sale del receptor. El CO<sub>2</sub> líquido subenfriado entra al supermercado y se distribuye a las vitrinas expositoras a MT y Baja Temperatura (LT) y a los evaporadores de la cámara frigorífica. Para ambos de estos tipos de evaporadores, el caudal de refrigerante viene gobernado por una válvula de expansión situada aguas arriba del evaporador y que controla la temperatura de la vitrina o de la cámara frigorífica y el sobrecalentamiento que sale del evaporador. Para el lado de LT del sistema, el caudal entra primero a los compresores de LT, que suben la presión y suministran directamente el CO<sub>2</sub> a la succión de los compresores de MT.

Este diseño del sistema maximiza el uso de los componentes, que ya están disponibles en el mercado dentro de un intervalo de presión (40 bares). Sólo los compresores de MT, los componentes de rechazo de calor, la HPV, y otros componentes diversos están diseñados para una exigencia de presión de 120 bares. En caso de un corte de presión, un enfriador auxiliar separado mantiene la presión dentro del receptor a menos de 40 bares. Los varios niveles de presión en el sistema están protegidos mediante el uso de válvulas de alivio de presión (PRV). Con el fin de prevenir un golpe de escape de refrigerante en las zonas ocupadas, estas PRV están situadas en el exterior al mercado y al cuarto de máquinas. Se ha implementado un nuevo concepto de válvula anti retorno para componentes internos, tales como grupos de vitrinas que se necesita desconectar para mantenimiento. Esto es una combinación de una válvula de corte y una válvula de retención. La válvula de corte se utiliza para aislar el componente para mantenimiento. La válvula de retención actúa cuando la presión dentro del componente aislado excede la presión en el otro lado de la válvula de aislamiento. Esta construcción evita el uso de costosas PRV para cada grupo de vitrinas, incrementando entretanto también la seguridad del sistema al eliminar la descarga de la PRV dentro de los espacios ocupados.

Se ha logrado la cualificación y la optimización de este sistema con CO<sub>2</sub> a través de una combinación de la cualificación del componente, del sistema y en campo. Cada uno de estos elementos es una parte importante del éxito en conjunto de la introducción del sistema con CO<sub>2</sub>, y cómo cada uno funciona como se describe en las secciones siguientes. La instalación completa consiste en 1200 m<sup>2</sup> de un área de pruebas para el componente y el sistema de CO<sub>2</sub>, 11 salas para pruebas, y una cámara adicional de pruebas con 11 vitrinas expositoras, con una superficie combinada de 1000 m<sup>2</sup>. La instalación contiene un circuito central de agua, que se usa para acondicionar los espacios y el equipamiento en cada una de las salas para pruebas, con una capacidad total frigorífica de 200 kW. Toda la instalación tiene 1 MW de potencia eléctrica útil y cuenta con un equipo humano de más de 15 personas, entre ingenieros y técnicos.

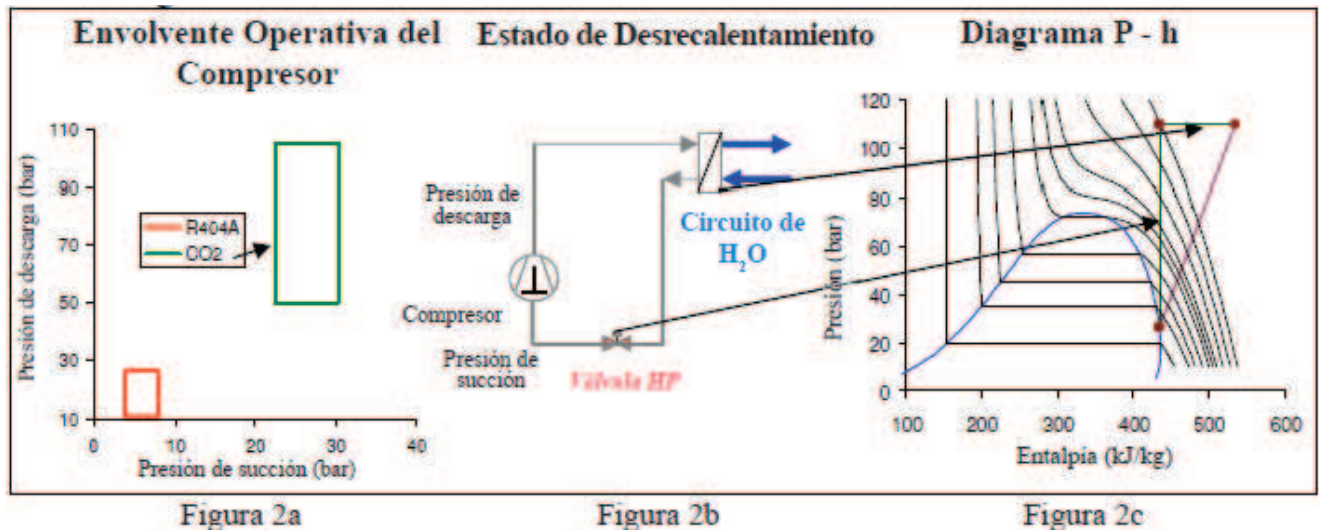
## 2. CUALIFICACIÓN DE COMPONENTES

Muchos de los componentes empleados en sistemas de refrigeración con CO<sub>2</sub> a MT se encuentran en intervalos de presión que son desconocidos para equipos comerciales. Debido a esto, anteriores sistemas transcíticos usaban muchos componentes industriales, que operaban funcionalmente, pero que no son soluciones aceptables a largo plazo debido a aspectos de coste y fiabilidad. Estos componentes incluyen válvulas, filtros y tubería. Otros componentes no se encontraban disponibles de fuentes industriales, y necesitaban ser desarrollados específicamente para las exigencias del entorno operativo de la refrigeración comercial. Esta categoría incluía compresores y enfriadores de gas. Una tercera categoría de componentes se encontraban disponibles y resultaban idóneos para utilizarlos en ciertas regiones del sistema, debido a la configuración del sistema tratado en la sección 1. Estos componentes incluyen evaporadores, secadores con filtro, y válvulas de expansión del evaporador. En todas estas categorías, se ha precisado de un trabajo para optimización del coste, así como para asegurar la fiabilidad y prestaciones. Ya que cada uno de estos componentes experimenta diferentes condiciones operativas, se han desarrollado una serie de bancos de pruebas para conducir el funcionamiento y las pruebas de cualificación. Éstos incluyen instalaciones para pruebas del compresor, enfriador de gas, válvula de alta presión y válvula de media presión y evaporador. En las subsecciones siguientes se describe cada una de estas instalaciones.

### 2.1 Bancos de Prueba para el Compresor

Los compresores de CO<sub>2</sub> operando en un intervalo de temperatura media funcionan con presiones de succión determinadas por la temperatura de evaporación dentro de la vitrina expositora o el evaporador de la cámara frigorífica. Por cuestiones de seguridad alimentaria, éstas se encuentran dentro de un intervalo relativamente reducido. Por otra parte, la presión de descarga variará considerablemente en base a la temperatura de rechazo de calor. Para los sistemas DX, esta presión se encuentra próxima a la presión de saturación a temperatura ambiente, cuando el sistema está funcionando en subcrítico. Aproximadamente por encima de 25-30 °C, el sistema funcionará en transcítico, y la presión seguirá una línea óptima que depende de la temperatura ambiente, el rendimiento del enfriador de gas y el rendimiento del compresor. Para los sistemas indirectos que utilizan un enfriador seco, las pérdidas en el intercambiador de calor determinarán una temperatura y presión más elevadas, lo que lleva a un mayor consumo de energía. Para el funcionamiento práctico en Centro Europa y Europa del Norte, es suficiente un límite superior de 110 bares. Con el fin de probar el rendimiento y la fiabilidad de estos compresores transcíticos, se construyeron varios bancos de prueba de desrecalentamiento. En las Figuras 2a, 2b y 2c se muestra una

comparación de la envolvente típica operativa en comparación con compresores para R404A, una disposición básica del banco de pruebas, así como la representación termodinámica del ciclo.



Los bancos de pruebas están diseñados para probar solo la parte de compresión del sistema, y por ello no necesitan un evaporador. El enfriador de gas se necesita sólo para eliminar el calor de compresión. Los parámetros que se han de fijar en estos sistemas incluyen las presiones de succión y descarga, así como el sobrecalentamiento en succión. Los dos primeros parámetros pueden establecerse vía una combinación del grado de apertura de la válvula de alta presión, así como la cantidad de carga en el banco de pruebas. El último parámetro está controlado por la entalpía saliente del enfriador de gas. Como la expansión es isoentálpica, y se conoce la presión de salida del enfriador de gas, el único parámetro remanente que se necesita es la temperatura, que está controlada al variar el caudal másico de agua, que refrigera el enfriador de gas. Debido a la naturaleza del ciclo transcrito, es posible entrar al compresor con calidad menor de la unidad cambiando simplemente la temperatura de salida del enfriador de gas. Esto permite la simulación de un reflujo continuo de líquido al compresor en un banco de pruebas relativamente simple.

Una experiencia anterior demostró que la selección del tamaño del enfriador de gas es crítica en funcionamiento estable del banco de pruebas. Si el enfriador de gas es demasiado grande, el CO<sub>2</sub> se sobreenfriará, resultando bien un sobrecalentamiento insuficiente o demasiado líquido en la succión del compresor. La situación opuesta resulta un sobrecalentamiento excesivo. La cualificación de los compresores ha seguido un protocolo riguroso, incluyendo cientos de horas fuera de la envolvente operacional, probando arranque-paro que implicaba cientos de miles de ciclos, probando reflujo de líquido con concentraciones muy altas de líquido, y probando arranque inundado. Se ha encontrado que las dos últimas pruebas fueron críticas para un funcionamiento fiable del compresor, debido a un grado muy elevado de sensibilidad que las viscosidades de la mezcla CO<sub>2</sub>-aceite tiene en el contenido de líquido. Debido al hecho de que estos sistemas usan compresores de velocidad variable, estas pruebas se han repetido para un funcionamiento en alta y en baja frecuencia. El rendimiento de los compresores se midió antes y después de cada una de las pruebas de cualificación, y los compresores se desmontaron después de cada prueba de cualificación para observar la ausencia de desgaste.

## 2.2 Banco de Pruebas del Enfriador de Gas

El intercambiador de rechazo de calor en los sistemas de refrigeración de comercial a MT con CO<sub>2</sub> actuará como un enfriador de gas cuando la presión exceda la presión crítica. Para la Europa Central hasta el Norte, esto sucederá durante el 20-30% del tiempo total operativo. El diseño de enfriadores de gas requiere una capacidad de presión hasta 120 bares. Por una parte, esto requeriría bien material de resistencia muy alta (acero) o bien mayor espesor de pared. Por otra parte, ya que la densidad del CO<sub>2</sub> es mucho más elevada que la de los refrigerantes convencionales, son más adecuados los tubos más pequeños. Con tubos más pequeños, se reduce el espesor de pared a igualdad de capacidad de presión. Varios fabricantes han comenzado a producir enfriadores de gas para CO<sub>2</sub>. Desafortunadamente, la capacidad de diseño de estos fabricantes no está totalmente madura, y como resultado, los enfriadores de gas instalados típicamente no cumplen las exigencias pretendidas. Se pretende con el banco de pruebas para el enfriador de gas mejorar la capacidad de diseño de la industria, así como optimizar el coste de estos intercambiadores.

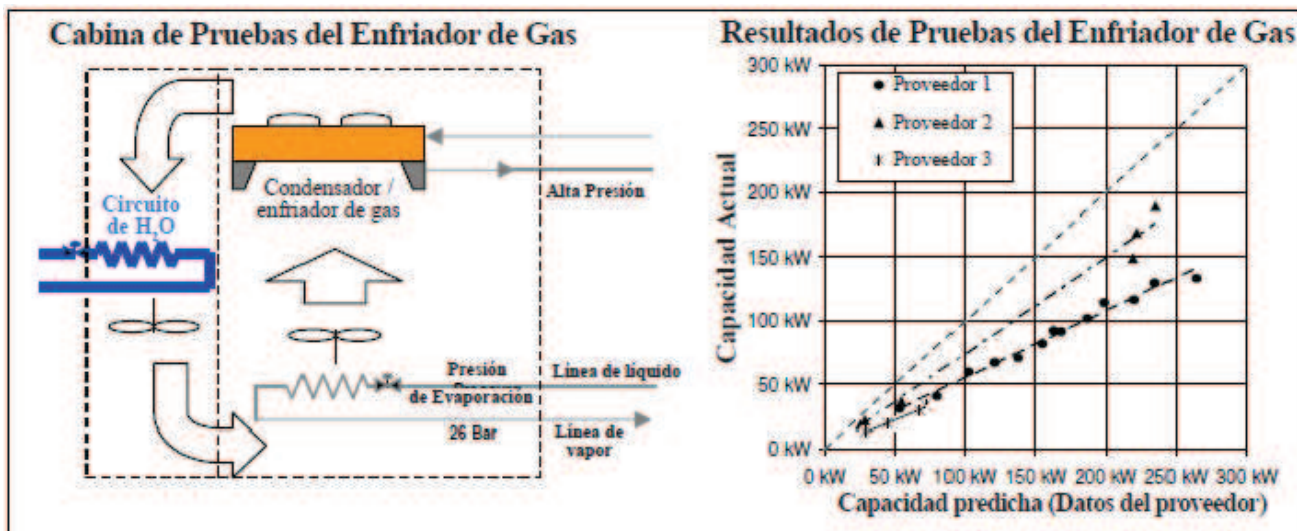


Figura 3

Figura 4

En la Figura 3 se muestra esquemáticamente el banco de pruebas para el enfriador de gas. El enfriador de gas de muestra se coloca dentro de la cabina de pruebas junto con unos evaporadores. Al banco de pruebas se le suministra CO<sub>2</sub> desde una batería remota de multi compresores a MT con CO<sub>2</sub> transcrito. El gas de descarga del compresor alimenta el enfriador de gas de muestra con valores variables del caudal másico, a fin de simular los diferentes tamaños de un enfriador de gas efectivo. El calor se evacua del enfriador de gas vía un ventilador que funciona a velocidad variable, lo que permite la simulación de variantes del enfriador de gas con alto y bajo nivel de ruido. Los evaporadores, que forman parte del mismo sistema de CO<sub>2</sub>, sacan la mayor parte del calor de la sala de pruebas. Ya que los evaporadores funcionan en condiciones normales de una cámara frigorífica (-15 a -5 °C), y la humedad en la cámara puede elevarse por rociado al efectuar las prueba del enfriador de gas, se halló que los evaporadores experimentaron bastante rápidamente la formación de escarcha (hielo), lo que impedía efectuar la prueba con precisión en los enfriadores de gas. Con el fin de mitigar esta situación, se instalaron dos conjuntos de evaporadores en paralelo. Mientras un conjunto se está desescarchando, el otro está enfriando la cámara. Mediante la optimización de la conmutación de los dos conjuntos de evaporadores, es posible alcanzar temperaturas constantes en la cámara. El calor residual, que corresponde al calor de compresión, se elimina vía el serpentín refrigerado por agua.

Como se ha indicado previamente, los resultados procedentes de este prueba han mostrado claramente el hueco existente entre el rendimiento predicho por el fabricante y el actual. La Figura 4 muestra este hueco para unos fabricantes, que se ha medido y ha llegado a ser como mucho el 50% del rendimiento reclamado del fabricante. La razón de este hueco tiene que ver con la ausencia de instalaciones para pruebas en casa de los fabricantes, lo que impide el desarrollo de herramientas validadas para el desarrollo. Mediante la utilización de esta instalación, ahora puede predecirse el diseño de enfriadores con un mayor grado de precisión. Además, esta instalación se ha usado para reducir el coste de los enfriadores de gas mediante el empleo de nuevos materiales, tales como aleaciones de cobre de alta resistencia, lo que permite, por ejemplo, espesores más pequeños de pared.

### 2.3 Bancos de Prueba para la Válvula

La HPV y las MPV en el sistema a MT con CO<sub>2</sub> son componentes que no se usan en los sistemas con HFC, y por ello se necesita desarrollarlos y cualificarlos nuevamente. Estos componentes nuevos son también un único punto de fallo en el sistema a MT con CO<sub>2</sub>. Ambos componentes eran de tipos industriales en los primeros sistemas transcrito con CO<sub>2</sub>. Estos componentes industriales eran caros y, debido a la dinámica de ambiente operativo, presentaban problemas de fiabilidad. La introducción de componentes comerciales ha requerido una extensa cualificación para asegurar que sistemas totalmente comercializados tengan una fiabilidad similar a la de los sistemas actuales con HFC. Además de esto, en particular el rendimiento de la HPV necesitaba estar totalmente caracterizado con el fin de asegurar que el rendimiento del sistema no se encuentre comprometido.

Con el diseño del banco de pruebas para la HPV y MPV se pretende la simulación completa del intervalo de funcionamiento de la válvula con el mínimo uso de energía. Con el fin de alcanzar estos objetivos, se escogió un ciclo de Rankine sobre el ciclo convencional inverso de Rankine. En la Figura 5a se muestra esquemáticamente el sistema, junto con una representación termodinámica en la Figura 5b. Las HPV en pruebas se colocaron en una cámara separada aislada e insonorizada. Dichas HPV se encuentran típicamente instaladas por parejas y en ciclo opuesto una a la otra con el fin de conseguir un grado de apertura relativamente constante. Se colocó una tercera válvula en paralelo con el fin de controlar la alta presión en el sistema. Como en un sistema típico a MT con CO<sub>2</sub>, la descarga de la HPV se efectúa directamente al receptor. El caudal de vapor procedente del receptor fluye a las series de MPV que funcionan de forma similar a las HPV, con un conjunto funcionando opuesto uno al otro, y una tercera válvula que controla la presión en el receptor. El nivel de

líquido en el receptor se controla mediante una válvula para líquido que estrangula el caudal a la succión. Las descargas de la MPV y de la válvula para líquido van directamente al condensador, que fluye a un receptor secundario. Después del receptor secundario, un subenfriador enfría luego el caudal de CO<sub>2</sub> antes de entrar a una de las dos bombas para líquidos de CO<sub>2</sub> controladas por velocidad variables. Las bombas suben la presión del CO<sub>2</sub> utilizando una fracción de la potencia requerida por los compresores de CO<sub>2</sub>. En la descarga de las bombas, el CO<sub>2</sub> se envía a dos intercambiadores de calor de tipo placa de alta presión montados en paralelo, que calientan el CO<sub>2</sub> hasta le entalpía deseada de entrada de la HPV, completando el ciclo. El condensador y los intercambiadores de calor del calentador de gas de CO<sub>2</sub> se enfrían y se calientan respectivamente mediante un sistema secundario con R404A. El balance de calor del sistema con R404A se completa vía un tercer intercambiador que elimina el calor de compresión, además del calor de la bomba de CO<sub>2</sub> del sistema. Este intercambiador de calor se enfría con agua tomada de la instalación central. Todo el banco de pruebas pretende simular los sistemas con CO<sub>2</sub> hasta 400 kW de capacidad a MT.

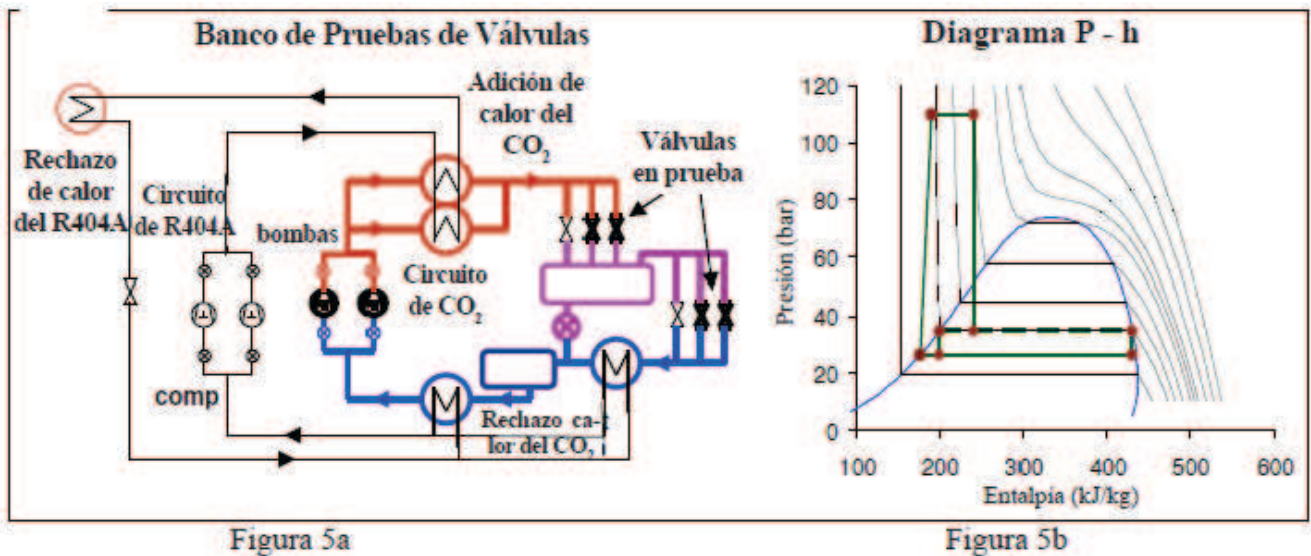


Figura 5a

Figura 5b

Las HPV y MPV de varios fabricantes se han tomado como punto de referencia, se han caracterizado y cualificado usando esta única instalación. Una cualificación típica consiste, en primer lugar, llevar a cabo una medición del rendimiento (Cv o Kv), luego someter a las válvulas a cientos de miles de ciclos, simulando el tiempo de vida útil en funcionamiento de la válvula, y luego realizando una medición final del rendimiento. Si se detecta cualquier ruido anormal durante el funcionamiento, se comprueba la válvula para asegurar que no existe resonancia u otra vibración que vaya en detrimento de la misma. Esta cualificación se ha realizado para cada fabricante de HPV y MPV y tamaño antes de colocar el tipo de válvula en servicio en una instalación en campo. Ha habido válvulas que no han pasado esta cualificación. Ya que el banco de pruebas está diseñado para caracterizar y cualificar válvulas que se usan en sistemas desde 30 hasta 400 kW, se diseñó el banco con un alto grado de flexibilidad. Ya que casi todo el caudal dentro del banco de pruebas es líquido o casi líquido, el transporte del aceite no representó un problema.

Además de las HPV y MPV, existe también una gran variedad de válvulas de corte que están en el sistema a MT con CO<sub>2</sub> para permitir dar mantenimiento a los componentes. Estas válvulas eran originalmente industriales por naturaleza, y tienen problemas similares a las primeras HPV y MPV utilizadas. Con el fin de ir a válvulas comercialmente más viables, se construyó una instalación para pruebas dentro del sistema con CO<sub>2</sub>. La instalación para pruebas ha permitido la simulación de las válvulas en un sistema actual bajo condiciones operativas extremas del sistema actual. Las válvulas objeto de pruebas se miden primeramente en cuanto a fugas, luego se someten a varias actuaciones que representan la vida útil de uso, y finalmente se vuelven a medir nuevamente. Los problemas típicos hallados durante esta prueba han sido con los materiales de sellado utilizados en la válvula. Estas instalaciones se han utilizado para cualificar varias válvulas de corte comercialmente viables y capaces de soportar altas presiones.

## 2.4 Banco de Pruebas para Evaporador

Los primeros evaporadores usados en los sistemas con CO<sub>2</sub> eran simplemente evaporadores con R404A, en los que se habían transformado ligeramente los circuitos, y cuyos diámetros interiores de tubos se habían reducido mediante el uso de tubos adicionales insertados dentro de los anteriores. Esto fue una forma rápida de llevar al mercado estos intercambiadores de calor sin verse afectado el lado aire del evaporador, pero también no era termodinámicamente óptima y al mismo tiempo muy costosa. La optimización del evaporador para CO<sub>2</sub> implica el uso de tubos con diámetros más pequeños así como menos circuitos. En muchos casos sólo es necesario un circuito. Ambos factores reducen significativamente el coste del evaporador. Sin embargo, cambios como éstos en el diseño afectan al lado aire del intercambiador de calor, y los cambios en el lado aire del evaporador para el caso de una vitrina pueden afectar la distribución de temperatura y las prestaciones de la vitrina expositora. Si se realiza una simple bajada sin punto de referencia, verificación y optimización, puede ser que las prestaciones de la vitrina no lleguen a ser las esperadas.

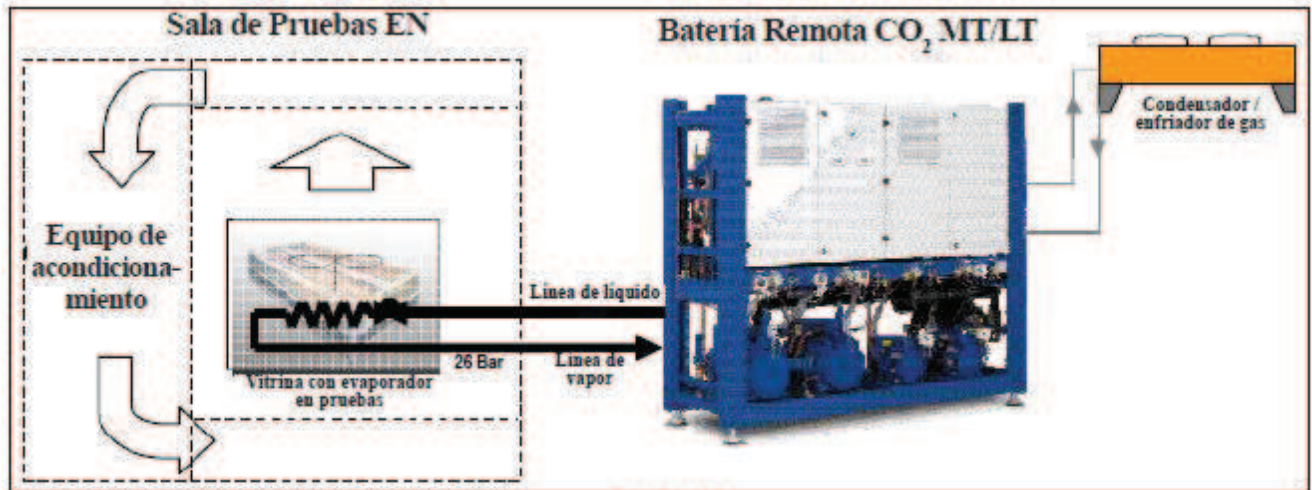


Figura 6

Teniendo esto presente, se han utilizado varias cámaras para pruebas certificadas EN de las vitrinas expositoras para optimizar el diseño de los evaporadores con CO<sub>2</sub>. En la Figura 6 se muestra esquemáticamente la configuración del sistema. Una batería remota a LT o MT para CO<sub>2</sub> proporciona el caudal de líquido a la vitrina, que se mide en la vitrina vía una válvula de expansión actuada por un motor paso a paso, que proporciona un caudal constante y permite medir el caudal de CO<sub>2</sub> a fin de manejar el balance de calor. Se controla el caudal de CO<sub>2</sub> para alcanzar un sobrecalentamiento deseado y la temperatura en la vitrina, antes de retornarlo a la batería remota.

## 2.5 Cualificación de Otros Componentes

Se han optimizado varios componentes para CO<sub>2</sub> destinados a aplicación comercial, incluyendo el distribuidor en succión, el receptor y la instrumentación (conmutadores de presión, transductores, galgas, etc.). Estos componentes se han cualificado en uno de los cuatro bancos de pruebas para sistema completamente transcrito, que se describen en la sección siguiente.

## 3. CUALIFICACIÓN DEL SISTEMA

Con el fin de probar algunos de los nuevos componentes para CO<sub>2</sub>, así como para asegurar la funcionalidad y fiabilidad de todo el sistema, se han montado una serie de sistemas completos para pruebas. Algunos de estos sistemas posibilitan el funcionamiento de los bancos de pruebas para componentes descritos previamente, mientras que otros se usan para probar los algoritmos del nuevo control o la funcionalidad de los componentes que interactúan con cada uno de los otros.

### 3.1. Banco de Pruebas para Multi-compresor

Antes de instalar cualquiera de los sistemas con CO<sub>2</sub> en campo, se construyó este banco de pruebas. Como es el caso en la mayoría de los bancos de pruebas a nivel de sistema, consiste en una unidad para pruebas y una unidad de acondicionamiento. La unidad para pruebas es una batería multi compresor a MT para CO<sub>2</sub> con cuatro compresores. La unidad de acondicionamiento para este banco de pruebas era originalmente un enfriador de gas de carcasa y tubo y una serie de evaporadores de intercambiador de calor de tipo placa. La eliminación y adición de calor de estas unidades se realizaba vía dos circuitos separados de glicol, que intercambiaban calor uno con otro en un intercambiador de calor grande del tipo placa. El balance de calor residual (calor de eliminación del compresor) se efectuaba vía otro intercambiador de calor del tipo placa, que se enfriaba por un circuito de agua del sistema. En la Figura 7 se muestra esquemáticamente este sistema. Cuando se comisionó el banco de pruebas descrito anteriormente para el enfriador de gas, se reconfiguró el banco de pruebas para multi compresor para permitir la operación de proporcionar CO<sub>2</sub> bien al sistema de acondicionamiento basado en glicol o al banco de pruebas para el enfriador de gas.

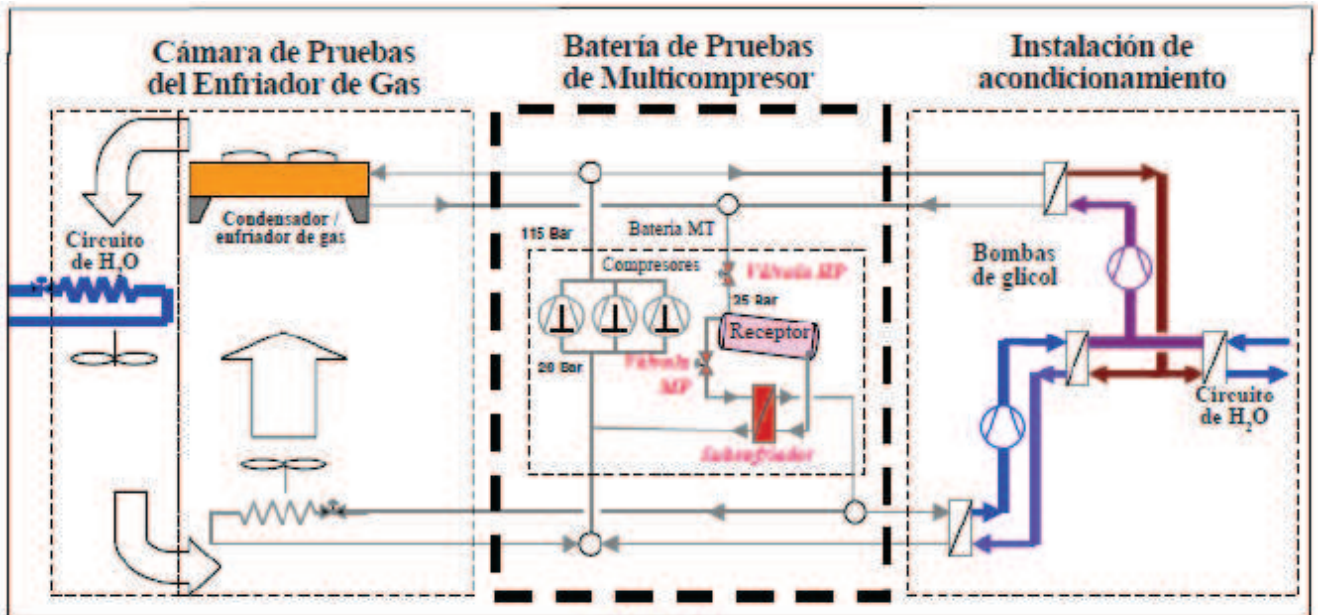


Figura 7

### 3.2 Banco de Pruebas para Supermercado

Durante la evolución del panel de producto para CO<sub>2</sub>, resultó evidente que el sistema original de acondicionamiento descrito en la sección 3.1 no sería suficiente para enfriar sistemas más grandes en un supermercado. Teniendo esto presente, se construyó un nuevo sistema de acondicionamiento basado en glicol con una capacidad de absorción de calor hasta de 600 kW. Este sistema de acondicionamiento era de naturaleza similar al descrito en la sección 3.1, con una excepción importante. Dadas las cargas esperadas en este sistema, y la cantidad de calor que se necesitaría rechazar al sistema de acondicionamiento con agua, es evidente que el circuito existente de agua con 200 kW de capacidad era insuficiente para atender a toda esta instalación. En vez de aumentar el tamaño del circuito de agua, se instaló un enfriador de gas /desrecalentador para CO<sub>2</sub> detrás de la instalación. El CO<sub>2</sub> que sale de los compresores se dirige directamente a este desrecalentador, que sólo elimina el calor de compresión procedente del sistema. El calor residual se usa para equilibrar la adición de calor que se necesita para los evaporadores. Este sistema es similar al mostrado en la Figura 7. Utilizando esta instalación, se han cualificado todas las baterías a MT y LT con CO<sub>2</sub> con capacidades de refrigeración de 250 kW y 160 kW, respectivamente. Un aspecto crítico en esta cualificación fue asegurar que los niveles de vibración dentro de la batería estuvieran dentro de intervalos aceptables, y las prestaciones del sistema estuvieran dentro del nivel esperado.

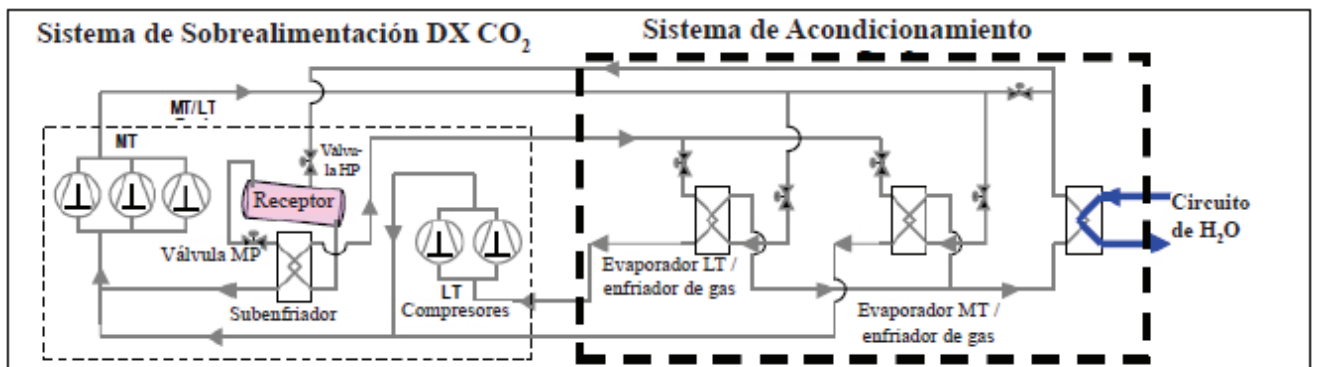


Figura 8

### 3.3 Banco de Pruebas para Tiendas de Descuento

La gama más pequeña de sistemas de CO<sub>2</sub> usa una estructura diferente y tiene capacidades del sistema entre 35 kW y 100 kW. Se ha desarrollado una instalación para pruebas completamente diferente para cualificar estos sistemas. El sistema de acondicionamiento usado en este banco de pruebas se basa en el intercambio de calor entre el calor echado y los intercambiadores de calor por absorción directamente. En otras palabras, el enfriador de gas y el evaporador son el mismo intercambiador de calor. Esta instalación incluía también la capacidad para condicionar caudales a LT como también a MT, de forma similar al sistema descrito en la sección 3.2. En la figura 8 se representa esquemáticamente el sistema.

Al igual que para posibilitar la cualificación de la gama más pequeña de baterías de CO<sub>2</sub>, este banco de pruebas también fue utilizado para cualificar el balance de aceite entre los compresores de LT y MT. Típicamente, los compresores de MT con CO<sub>2</sub> tienen sustancialmente una mayor circulación de aceite que los compresores de LT con CO<sub>2</sub>. Ya que el sistema descrito en la Figura 1 es un sistema de sobrealimentación, estos dos compresores están en el mismo sistema. Además, el

diseño, favorecido por razones de fiabilidad, coste y prestaciones, evita el uso de separadores de aceite. Los separadores de aceite tiene siempre asociada una caída de presión, que impacta en la eficiencia del sistema más que el impacto que el aceite tiene sobre la transmisión de calor en los evaporadores. Además, los separadores de aceite y las válvulas asociadas son modos adicionales propensos al fallo para el sistema. Sin los separadores de aceite, el aceite que sale de los compresores de MT se concentrará en el receptor, y eventualmente buscará su camino para ir a los compresores de LT. Si no se hiciera nada, los compresores de LT estarían eventualmente inundados de aceite mientras que los compresores de MT quedarían secos y fallarían. La solución se desarrolló conjuntamente con los fabricantes de compresores, e implicó una modificación en el diseño del compresor de LT. Todos los compresores con el nuevo diseño se cualificaron bajo condiciones extremas de funcionamiento de caudal máximo y mínimo de aceite.

### 3.4 Banco de Prueba para el Sistema de Control

Todos los sistemas descritos anteriormente captan parte de la dinámica del sistema experimentada por un sistema totalmente operativo para un supermercado. Esto se debe principalmente al hecho de que los evaporadores y enfriadores de gas utilizados en los circuitos de acondicionamiento no son representativos de los utilizados en este campo. Un intercambiador de calor del tipo placa tiene una respuesta muy rápida, mientras que un evaporador típico con tubo redondo y placa con aletas tiene una respuesta de tiempo más largo. Con el fin de captar y caracterizar esta dinámica del sistema, se acopló una batería pequeña de sobrealimentación de MT/LT con CO<sub>2</sub> de 35 kW a un número de vitrinas expositoras de MT y LT en un supermercado pequeño de prueba. Esta instalación ha permitido la verificación de los algoritmos del sistema de control en un entorno representativo. Este banco de pruebas se utiliza también para suministrar CO<sub>2</sub> para la cualificación de los evaporadores descritos en la sección 2.4.

## 4. CUALIFICACIÓN EN CAMPO

La cualificación en campo es una parte importante de la cualificación global del sistema. Antes de que se instale en campo cualquier componente nuevo en el sistema, se somete a una cualificación rigurosa el componente y los bancos de pruebas a nivel de sistema descritos en las secciones precedentes. El componente y los FMEA se realizan con un equipo multidisciplinario para minimizar los riesgos al cliente. Todas estas acciones llevan el nivel de riesgo a un punto donde es posible efectuar la prueba en la ubicación del cliente. El propósito de la prueba en campo es descubrir las incógnitas desconocidas. A cada uno de los ensayos en campo se le hace un seguimiento vía monitorización remota. La fiabilidad de cada uno de los componentes críticos, así como todo el sistema, se someten a un seguimiento vía el diagrama de crecimiento de fiabilidad y el análisis de Weibull. Cuando se han alcanzado suficientes horas para verificar el objetivo deseado de fiabilidad dentro del compromiso aceptado de confianza, el sistema queda listo para la venta general.

A partir de la fecha de este escrito, Carrier ha instalado más de 100 sistemas para supermercados con CO<sub>2</sub> transcrito, en los lugares de los clientes repartidos por el centro y norte de Europa. Al tiempo que se publique este artículo, el número de estas instalaciones ha crecido sustancialmente.

## 5. CONCLUSIONES

Se han descrito una serie de bancos de prueba e instalaciones que han posibilitado el desarrollo de una gama de sistemas de refrigeración a MT y LT con CO<sub>2</sub>, comercialmente viables para supermercados. El uso de estas instalaciones ha sido crítico para asegurar la fiabilidad y las prestaciones de los sistemas instalados.

### AGRADECIMIENTO

La Dirección Técnica de FRIO CALOR AIRE ACONDICIONADO S.L. desea mostrar su agradecimiento a los autores del mencionado estudio, **Tobias Siemel y Oliver Finckh**, de **Carrier Kältetechnik Deutschland GmbH**, así como a **Mme. Susan Phalippou**, Directora de Conferencias & Promoción del **International Institute of Refrigeration – IIR-IIF** ([www.iifir.org](http://www.iifir.org)) ([iif-iir@iifir.org](mailto:iif-iir@iifir.org)), por la amable atención dispensada al autorizar la publicación de la citada ponencia en nuestra Revista.

### FUENTES DOCUMENTALES

(\*) *9<sup>a</sup>-IIF/IIR Gustav Lorentzen Conference: natural refrigerants: real alternatives* - Proceedings-Paper 131-[#11AA-09]

(\*\*) *La "9<sup>a</sup> Conferencia Internacional Gustav Lorentzen de IIR/IIF: refrigerantes naturales: alternativas reales" se ha celebrado en el Centro de Exposiciones y Conferencias de Sidney (2010), y ha estado organizada por el International Institute of Refrigeration (IIR/IIF) ([www.iifir.org](http://www.iifir.org)) ([iif-iir@iifir.org](mailto:iif-iir@iifir.org)), y el Australian Institute of Refrigeration Air Conditioning and Heating Inc (AIRAH) (<http://www.airah.org.au>) [Instituto Australiano de Refrigeración, Aire Acondicionado y Calefacción], bajo la presidencia del Profesor Aliakbar Akbarzadeh (RMIT).*