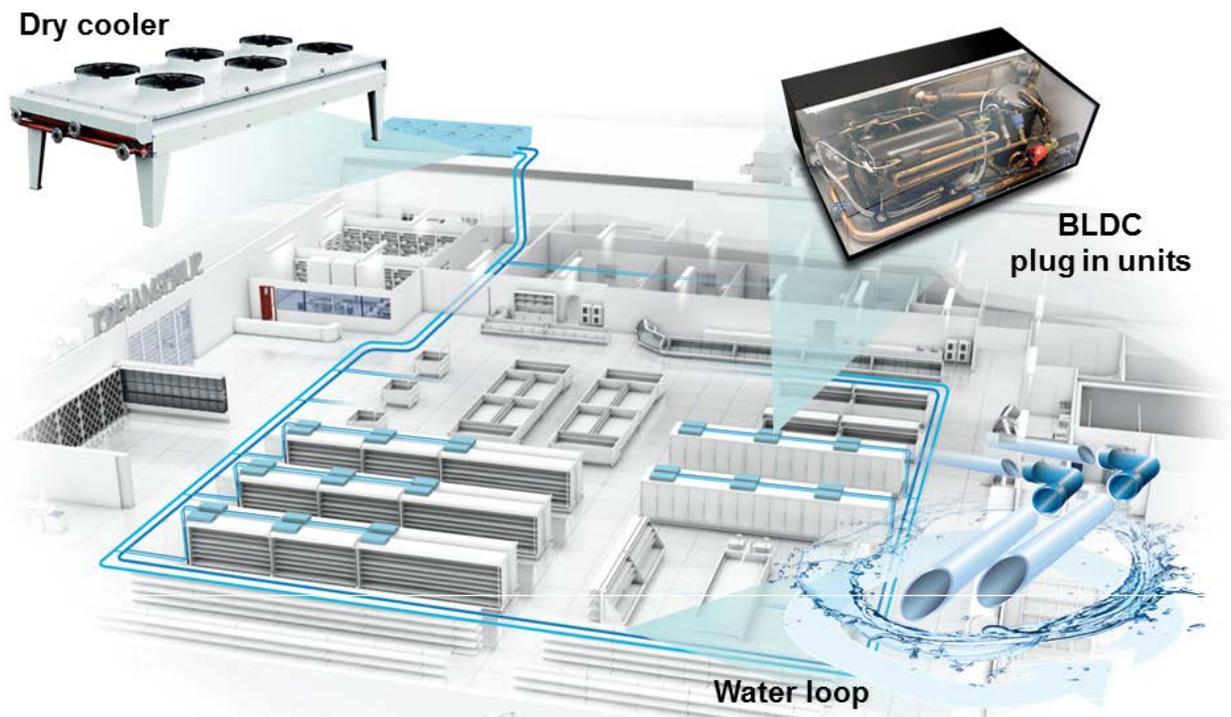


Título: Instalaciones de refrigeración comercial de alta eficiencia con compresores BLDC y circuito de agua.

Autores:

- Tommaso Ferrarese – HVAC/R Laboratory, Carel Industries S.p.A.
- Giacomo Bagarella – PhD Energetic Engineering, University of Padua.
- Ponente: Andreina Figuera, National Sales manager SP-PT Carel Ibérica.

Empresa: Carel.



Introducción

Los datos estadísticos sobre los sistemas de expansión directa tradicionales muestran fugas de refrigerante en un rango entre 10 % y 15 %, se conoce que incluso pueden llegar a superar este valor. Considerando el alto potencial de calentamiento atmosférico del R404A (y otros refrigerantes fluorados) y la cantidad de refrigerante usado normalmente en un supermercado, la contribución directa al efecto invernadero es bastante significativa.

En promedio, la refrigeración representa más de la mitad del consumo total de energía de los supermercados. Alrededor del 65 % de éste consumo, se debe al funcionamiento del compresor y de los condensadores. Por ende, al aumentar la eficiencia del sistema de refrigeración, se puede aportar un ahorro energético y económico importante.

La solución del circuito de refrigeración, enfriado por agua, que presentamos aquí, consiste en un sistema de refrigeración comercial que utiliza unidades de refrigeración equipadas con compresores inverter tipo BLDC; éste sistema tiene un circuito de agua, en forma de anillo, el cual se utiliza para la recuperación del calor generado por los servicios refrigerados y las cámaras frigoríficas.

Eliminando la necesidad de largas tuberías que transportan el refrigerante en toda la instalación de refrigeración comercial, y la consiguiente necesidad de reducción de numerosas operaciones de soldadura en el lugar, puede reducir la probabilidad de fugas anuales; además se reduce también de manera drástica la cantidad de carga de refrigerante, obteniéndose así, importantes beneficios en términos de una disminución drástica de la contribución directa al efecto invernadero.

El uso de compresores instalados directamente en cada unidad y la posibilidad de modular la velocidad de operación significa que la temperatura del aire y la temperatura de evaporación se pueden mantener en valores óptimos, evitando las ineficiencias inherentes en los ciclos de encendido y apagado de una central de compresores. La caída de presión es significativamente menor cuando se compara con una instalación de central de compresores tradicional. La eficiencia energética es mayor, y hay una reducción en la contribución indirecta al efecto invernadero.

Se ha realizado un análisis del consumo de energía en una instalación real, sobre la base de los primeros meses de adquisición de datos, y se utilizó para generar un modelo matemático para la comparación con los datos procedentes de los sistemas tradicionales. Hoy en día, ya se cuentan con varias instalaciones con anillo de agua y compresores de tipo BLDC funcionando a nivel mundial y en cada caso se continúa a recoger datos de consumo energético y de comportamiento termodinámico de estos sistemas. En pocos meses de funcionamiento, ya se puede apreciar los beneficios de este sistema, no sólo a nivel de consumo energético, sino también en la estabilidad de las temperaturas de funcionamiento y de conservación del producto.

La solución del circuito de agua con compresores de tipo BLDC

La unidad de refrigeración:

El servicio refrigerado fue diseñado para contener todos los componentes del circuito de refrigeración, incluyendo el compresor y la parte de condensación.

La solución aquí descrita utiliza una unidad de condensada por agua que está formada por una carcasa de metal que contiene el compresor horizontal, el condensador - diseñado específicamente para la aplicación - el receptor de líquido y la tubería.



Figura 1: Diagrama de la unidad condensada por agua.

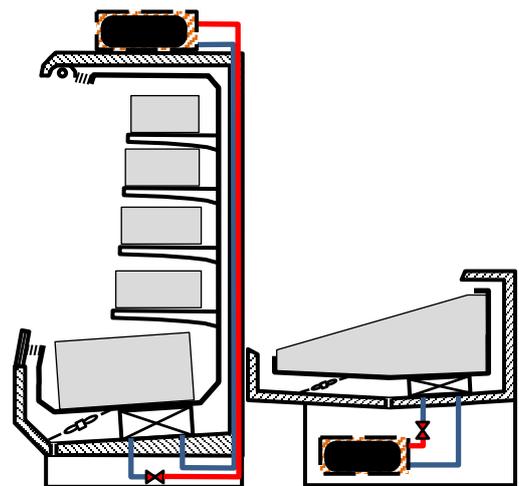


Figura 2: Posición de la unidad condensada por agua en en los diferentes tipos de servicios refrigerados.

La unidad condensadora se puede instalar sobre el servicio refrigerado o sobre la cámara refrigerada, o puede ser alojado en la parte inferior del servicio refrigerado.

Ésta unidad se ensambla en la fábrica, garantizando una soldadura de mayor calidad que minimiza la probabilidad de fugas de refrigerante en campo.

La unidad condensadora puede servir un evaporador o varios evaporadores con el mismo compresor; en este último caso se habla de configuración multicircuito.

El control electrónico desarrollado específicamente para ésta aplicación (HEOS), gestiona la velocidad del compresor y la apertura de la válvula de expansión electrónica de tipo proporcional para suministrar la cantidad de refrigerante adecuada de acuerdo al tamaño de los intercambiadores de calor y a la carga requerida; al mismo tiempo, el control logra mantener el funcionamiento del compresor dentro de sus límites de funcionamiento (envelope). Esta posibilidad garantiza que el sistema puede ser utilizado eficazmente incluso con intercambiadores de calor más pequeños y cargas variables, asegurando la máxima eficiencia y el alcance de la capacidad de refrigeración que refleja estrechamente la demanda instantánea.

Se han seleccionado compresores de tipo BLDC horizontales, debido a que son más ligeros, durante su funcionamiento hacen menos ruido y son de dimensiones más reducidas. La unidad se ha equipado con un condensador refrigerado por agua debido a:

- Necesidad de extracción de calor producido por las unidades de refrigeración.
- Posibilidad de recuperación de calor generado por las unidades y aprovechado en otros puntos de la instalación.
- Bajos niveles de ruido.

El anillo de agua:

El anillo de agua se configura en función a las necesidades de cada instalación con respecto a números de servicios de temperatura media, negativa y temperatura exterior, de igual forma se toman en cuenta la elección de recuperación de calor más adecuada.

En este caso de estudio, el sistema cuenta con un circuito de agua primario y tres circuitos secundarios, cada circuito está dedicado a cada nivel de la evaporación de los servicios refrigerados.

Se ha utilizado una bomba de calor aire / agua / agua y un dry cooler se han instalado en el circuito primario. También se ha utilizado una bomba de calor agua / agua para reducir la temperatura de condensación de la unidad de baja temperatura y por lo tanto aumentar la eficiencia energética.

Se han utilizado válvulas de tres vías y bombas de circulación de velocidad variable para asegurar una temperatura constante del agua en la salida y una diferencia de temperatura constante entre la salida y de retorno.

La función de la bomba de calor en el lazo primario es recuperar el calor producido por las unidades de refrigeración y, a continuación, usar éste calor para calentar el agua en un tanque de almacenamiento a una temperatura adecuada para calentar el resto de la instalación en el supermercado; también proporciona energía térmica para el precalentamiento del agua caliente

sanitaria y otros dispositivos accesorios (por ejemplo, bobina para derretir la nieve, etc). Durante la temporada de verano, en el otro lado, se puede transferir la carga de calor hacia el exterior, manteniendo el circuito de agua a la temperatura deseada.

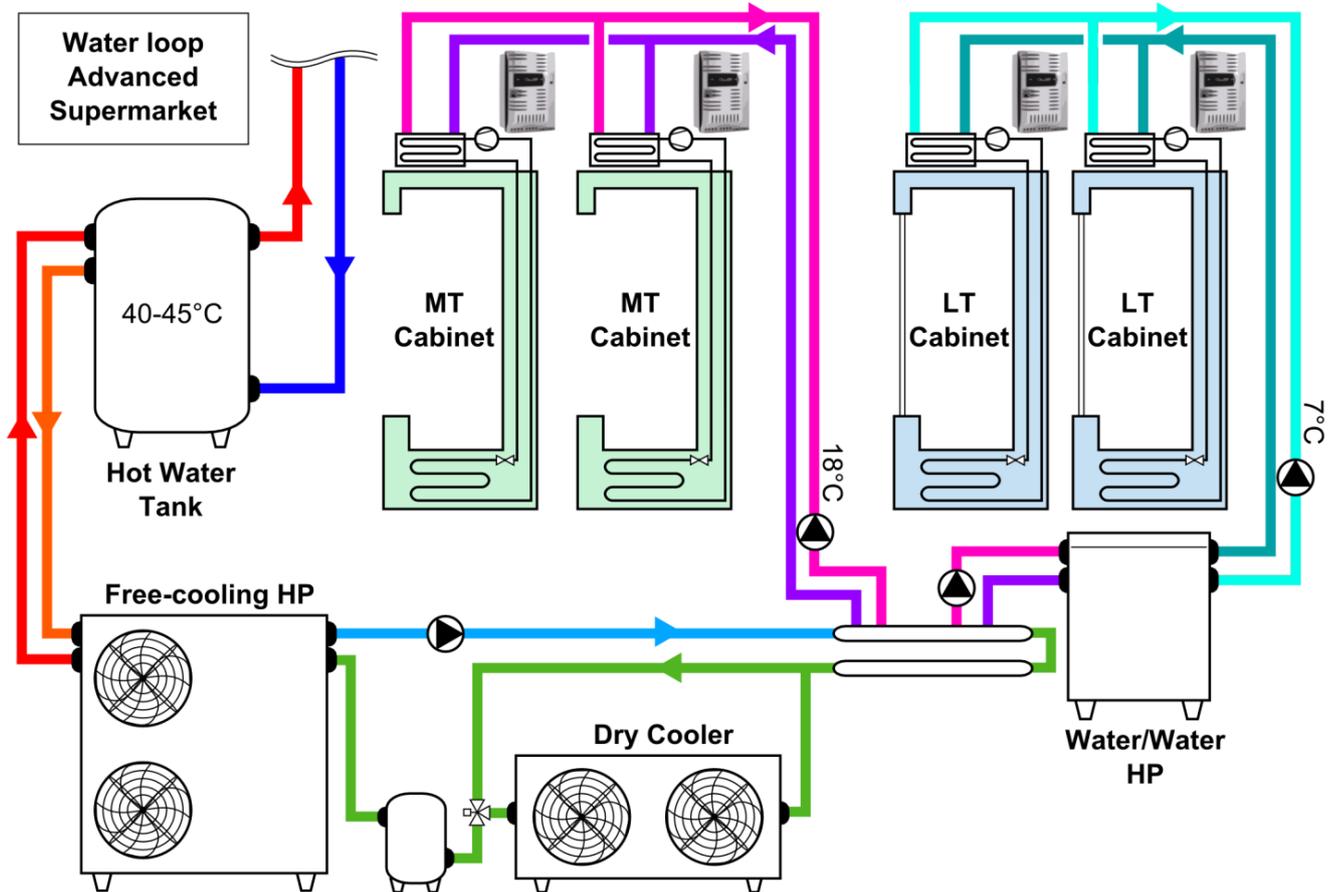


Figura 3 - Diagrama simplificado del sistema de circuito de agua

Operación de acuerdo a las condiciones climáticas:

En la estación fría, la configuración del sistema asegura la recuperación total del calor generado por los servicios y cámaras refrigeradas para calentar el supermercado. Si la instalación no requiere calefacción, éste calor se puede transferir a la parte exterior a través del dry cooler.

En la temporada de verano, cuando la temperatura exterior no permite la transferencia de calor mediante el dry cooler, la bomba de calor puede funcionar en modo de enfriadora, manteniendo el anillo de agua, a una temperatura que maximiza la eficiencia del sistema.

En períodos con temperaturas media, el sistema funciona con el drycooler; la bomba de calor se activa cuando se requiere calentamiento en el edificio o cuando la temperatura exterior impide el uso eficiente del drycooler.

El uso de compresores de tipo BLDC inverter en la bomba de calor, garantiza que en estas condiciones también, la transferencia de calor usando el dry coler se pueda mantener en parte activa, asegurando una vez más la óptima eficiencia.

Reducción de carga de refrigerante y de fugas:

En un supermercado tradicional, la carga de refrigerante es muy alta, debido principalmente a las largas secciones de tuberías que conectan la central de compresores a los servicios refrigerados.

Se puede estimar que en un supermercado tradicional, la carga, por ejemplo, de R404A por kW de potencia frigorífica instalada es de alrededor de $3,5-4 \text{ kg} / \text{kW}^1$. Mediante el uso de compresores de a bordo, la carga de refrigerante específico se puede bajar a menos de $1 \text{ kg} / \text{kW}$, lo que significa una reducción de más del 80 % .

Estadísticamente, las fugas en una instalación tradicional son entre el 10% y el 15%². Con el uso de compresores a bordo de los servicios refrigerados, se podría reducir la probabilidad de fuga de refrigerante a una cifra de alrededor del 1%.

Por otra parte, la cantidad de refrigerante que se podría liberar en la instalación en el caso poco probable de una fuga importante, se limita a la carga de refrigerante en el servicio refrigerado individual, mientras que en los sistemas centralizados existe un riesgo mayor, ya que engloba el contenido de refrigerante de toda la línea de la instalación.

Aumento de la eficiencia energética:

Observando la tendencia diaria de la carga de calor necesario a ser transferido por el servicio refrigerado, es evidente cómo la mayoría de las veces las unidades operan a carga parcial (la cantidad de producto refrigerado varía a lo largo del día en los servicios refrigerados). Esto se debe a las variaciones en la ocupación de supermercados, las condiciones de temperatura interior, la apertura de las puertas en los servicios refrigerados cerrados o cámaras frigoríficas, las condiciones de operación durante la noche con la variación del punto de consigna, apagar las luces y bajar las cortinas.

¹ IEA Annex 26: *Advanced Supermarket Refrigeration/Heat Recovery Systems*;

State of California Resources division - Inventory of Direct and Indirect GHG Emissions from Stationary Air Conditioning and Refrigeration Sources, with Special Emphasis on Retail Food Refrigeration and Unitary Air Conditioning CARB Agreement No. 06-325.

² MTPROG 2007, BNCR36: *Direct Emission of Refrigerant Gases, Market Transformation Programme, DEFRA, UK; AIRAH guide – methods of calculating TEWI Draft 1.1 – 2011.*

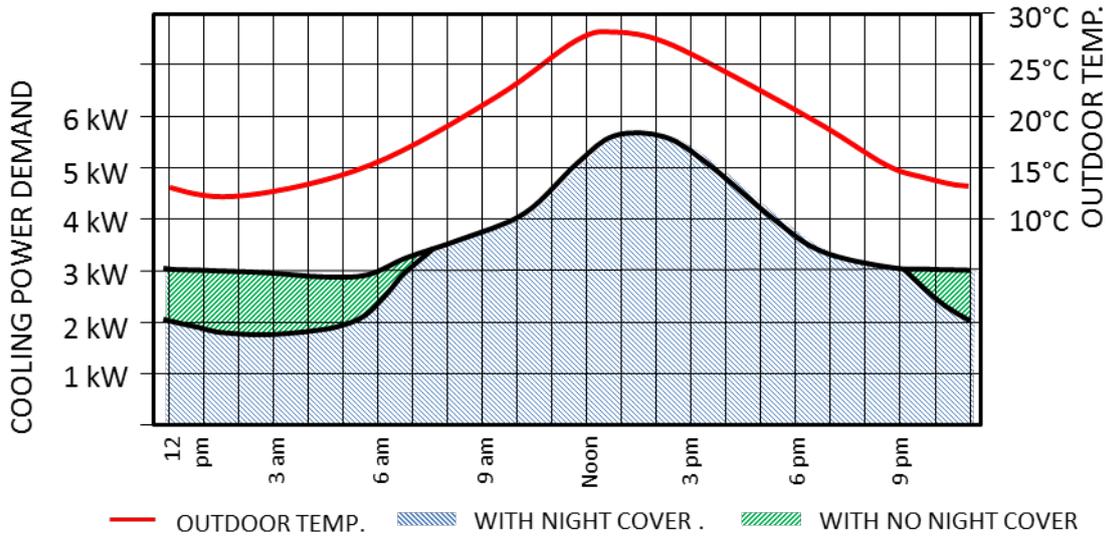


Figura 4 - Tendencia diaria en la carga de refrigeración.

El evaporador está dimensionado para una carga nominal y como regla general, la capacidad de enfriamiento depende de la diferencia de temperatura entre la temperatura del aire y la temperatura de evaporación, siempre que la unidad opere a carga reducida, la temperatura de evaporación necesaria para generar la capacidad de refrigeración requerida es más alta que el valor nominal.

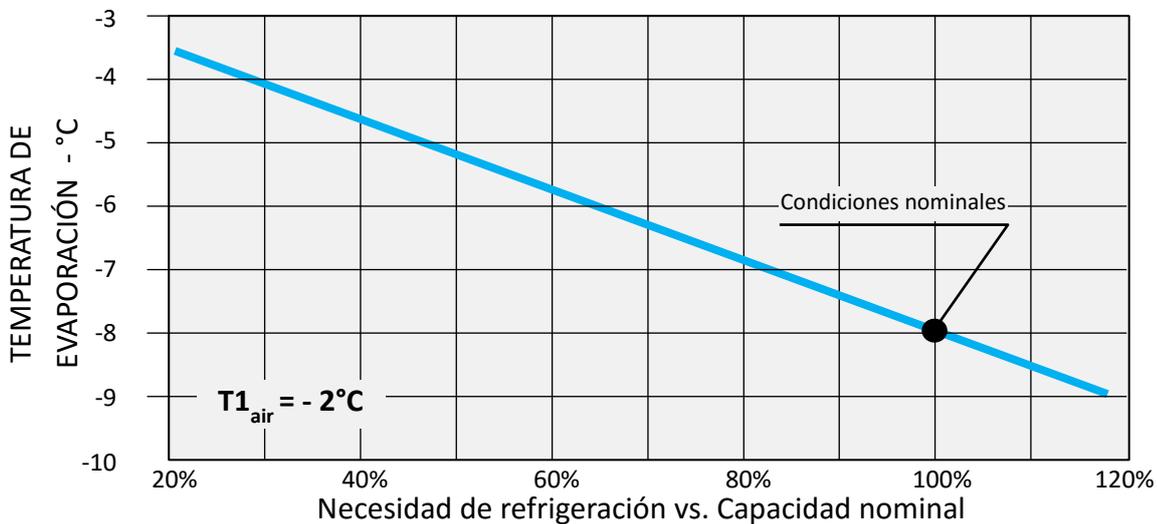


Figura 5 - Tendencia teórica en la máxima temperatura de evaporación posible de acuerdo a la carga parcial de refrigeración.

En un supermercado tradicional, la central de compresores trabaja en un punto de consigna fijo, a fin de garantizar siempre la presión de aspiración necesaria para satisfacer la carga nominal. El resultado es que la mayoría de las veces, los servicios refrigerados funcionan a una temperatura de

evaporación inferior a la necesaria, modulando la capacidad de refrigeración en exceso a través de una secuencia de ciclos de encendido / apagado.

Una solución para eliminar esta ineficiencia es usar la temperatura de evaporación flotante. El sistema de control puede calcular, en intervalos regulares, la presión de evaporación máxima a la que el sistema puede trabajar.

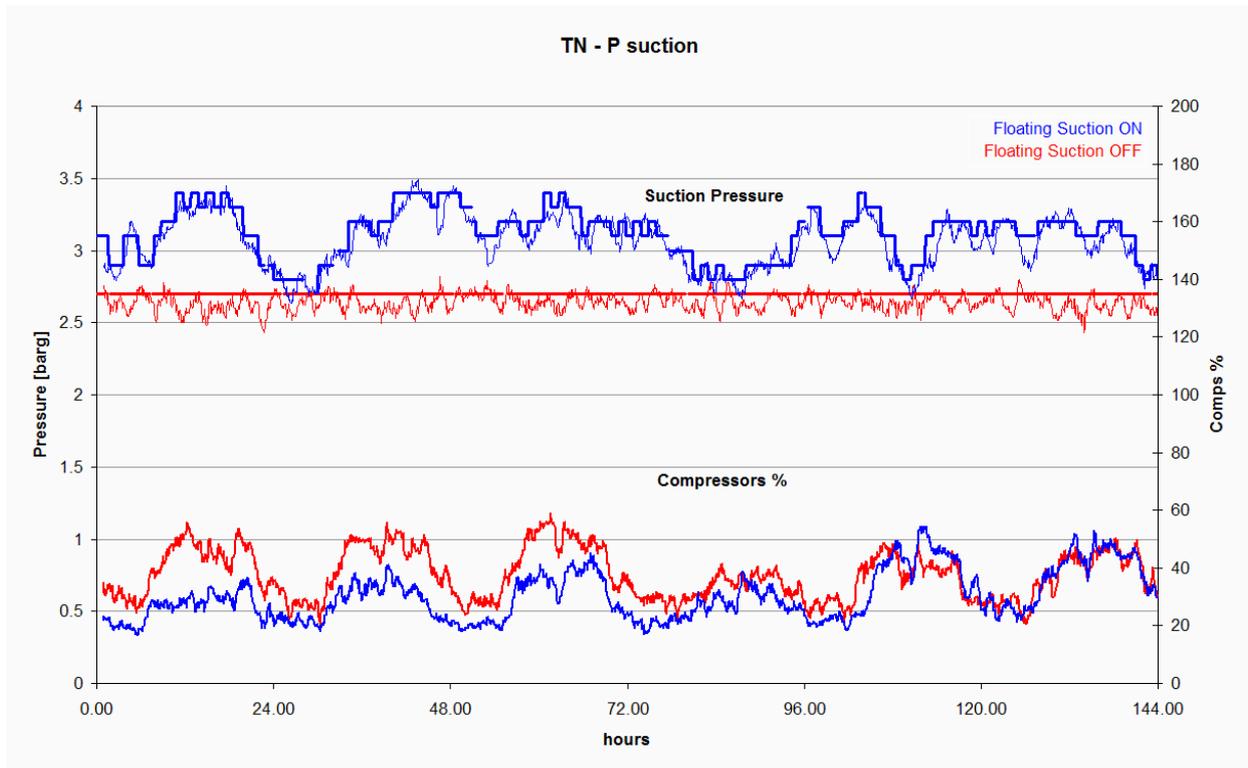


Figura 6: Comparación de operación entre sistemas con temperatura de evaporación fija y sistemas con control activo para temperatura de evaporación variable. Se puede ver cómo la presión de evaporación sigue una tendencia diaria, siendo más alto que el punto de consigna fijo la mayor parte del tiempo.

Un sistema de supermercados tradicionales por lo general incluye una línea de baja temperatura y una línea de media temperatura, cada una de éstas, servidas por un rack de compresores. Cada línea incluye varios servicios refrigerados, muchas de las cuales tienen diferentes puntos de consigna de temperatura y diferentes tendencias de la demanda de refrigeración. Con esta configuración, incluso cuando se utiliza temperatura de evaporación flotante, el servicio refrigerado que en el intervalo de tiempo considerado requiere la temperatura más baja de evaporación, determinará el resultado global. Todos los otros servicios refrigerados serán por lo tanto forzados a operar a una temperatura de evaporación más baja de la reamente necesaria.

La siguiente tabla muestra las temperaturas del producto, el aire y la evaporación típicos para las unidades de refrigeración en un supermercado tradicional.

Aplicación		T_{co} Temperatura de conservación de producto - °C	T_{1air} Temperatura de descarga del aire °C	T_{ev} – Temperatura de evaporación típicamente usada - °C				
				Multievaporador abierto	Evaporador individual abierto	Tub	Obradores	Cámaras
MT	Lácteos	+2 to +4	-1 to +1	-7 to -5	-7 to -5	-12 to -10	-7 to -5	-4
MT	Charcuteria	+2 to +4	-1 to +1	-7 to -5	-7 to -5	-7 to -5	-7 to -5	-3
MT	Carne /Pescado	0 to +1	-3 to -2	-8 to -7	-8 to -7	-9 to -8	-	-6
MT	Terminados	+3 to +5	-1 to +1	-7 to -5	-7 to -5	-9 to -7	-	-5
MT	Bebidas	+3 to +4	1	-5	-5	-	-3	-
LT	Comida congelada	-18 to -20	-22 to -24	-30 to -32	-30 to -32	-28 to -30	-27 to -29	-28
LT	Helados	-23 to -25	-27 to -29	-	-33 to -35	-33 to -35	-33 to -35	-33
HT	Preparación de carnes	-	10	-	-	-	-	-2

(*) En las siguientes condiciones ambientales: 24°C – 55% RH

Tabla 1: Temperatura de funcionamiento para diferentes tipos de unidades de refrigeración. Si está equipado con compresor de a bordo, la temperatura de evaporación estaría más cerca de la temperatura del aire, con beneficios en términos de eficiencia energética.

La solución con compresores a bordo hace que cada servicio refrigerado sea independiente de los otros en términos de temperatura de evaporación, con el resultado de que sólo la capacidad de refrigeración requerida se entregue a cada uno.

Si se usara un compresor de tipo on/off, éste, entregaría siempre la capacidad nominal, manteniendo una diferencia constante entre la temperatura del aire y la temperatura del refrigerante; la modulación de la capacidad sería con ciclos de encendido / apagado.

El uso de compresores de velocidad variable elimina la ineficiencia de funcionamiento a cargas parciales en el servicio refrigerado individual. Mediante la modulación continua de la capacidad de enfriamiento, la temperatura de evaporación se puede mantener en torno al valor más alto posible para la carga de enfriamiento, la maximización de la eficiencia energética, así como la consecución de una temperatura de aire más estable.

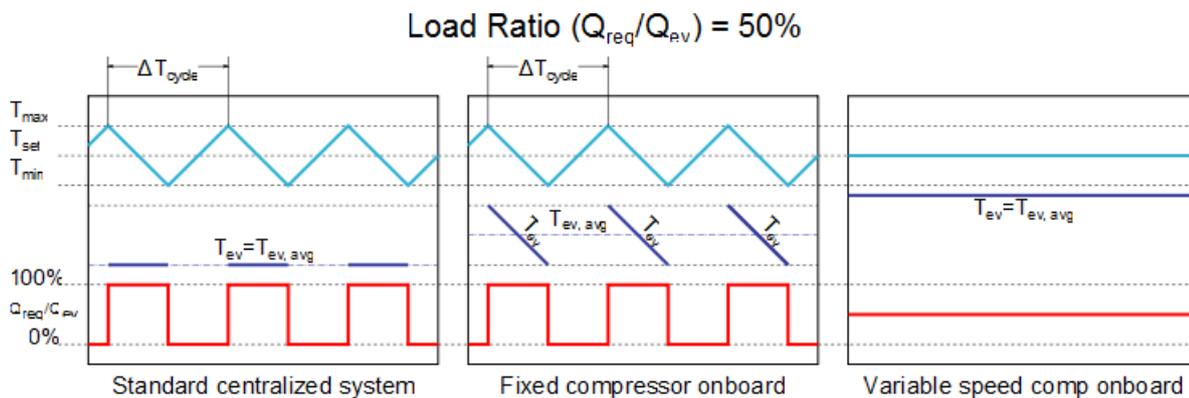


Figura 7: Evolución de la temperatura de evaporación en funcionamiento constante en comparación con la temperatura del aire en un sistema centralizado, un sistema con compresor a bordo de velocidad fija y otra con compresor a bordo de velocidad variable, con un factor de carga del 50%. Se puede observar cómo en el primer caso la diferencia entre la temperatura de evaporación y la temperatura del aire es más alta, en el segundo caso, esto se reduce, sin embargo todavía hay ineficiencias debidas a los ciclos de encendido / apagado, mientras que en el sistema de compresor de velocidad variable con la temperatura de evaporación está en el máximo permitido para las condiciones del sistema, con ventajas en términos de eficiencia energética.

Por último, también vale la pena destacar cómo, cuando la temperatura de evaporación está más cerca del valor óptimo, se forma menos hielo en los evaporadores, reduciendo así el número de desescarche y aumentando así, la eficiencia energética.

Consideraciones con respecto al costo.

Uno de los aspectos más interesantes de la solución con compresores a bordo es que los costos iniciales no son mayores que en una instalación tradicional, y que estos costos aportan beneficios en términos de confiabilidad, flexibilidad y mantenimiento.

Los servicios refrigerados son la única parte de la solución con un costo más alto en comparación con las instalaciones tradicionales, debido a la presencia del compresor y de la unidad de condensación de la instalación.

Las unidades que controlan la temperatura del circuito de agua cuentan con una alta fiabilidad, debido a la utilización de compresores BLDC (en lugar de los compresores de pistón semihermético más caros), los cuales en funcionamiento constante siempre trabajan a temperaturas más favorables (alta temperatura de evaporación). Además, estas unidades están diseñadas para ser instalados en el exterior del servicio refrigerado, eliminando así la necesidad de salas de máquinas en el interior del supermercado.

La carga de refrigerante inferior y la reducción de fugas, no sólo conducen a una disminución en la contribución al efecto invernadero, sino también de aportar considerables beneficios de costos, especialmente en países donde los refrigerantes están fuertemente gravados.

La *puesta en marcha* del sistema se facilita en la instalación puesto que las unidades condensadas por agua, deben ser probadas en fábrica y no se requiere calibración u optimización de la carga de refrigerante.

La *arquitectura del sistema* hace que sea más fácil mover y sustituir los servicios refrigerados, ya que es sólo necesario modificar las conexiones de agua.

Los enfriadores utilizados para enfriar el anillo, no necesitan ser instalados cerca de las unidades de refrigeración, ya que no hay problemas relacionados con la caída de presión o de refrigerante adicional necesaria en el circuito, como es el caso con los sistemas centralizados.

La *fiabilidad* del sistema es muy alta porque todos sus componentes son ensamblados y probados en la fábrica, evitando así cualquier problema de calidad relacionados con el montaje en el campo. Los compresores instalados en las unidades, fabricadas en grandes volúmenes por las principales empresas tecnológicas, también tienen la ventaja de operar en condiciones óptimas en cuanto a la carga de refrigerante y con retorno de aceite regular.

Los *costes de funcionamiento* son más bajos como resultado de:

- Mayor eficiencia del sistema.
- Posibilidad de recuperación de calor.
- Funcionamiento con sólo drycooler, cuando las condiciones externas lo permitan.
- Disminución de la probabilidad de fugas de refrigerante. De hecho, la carga total de cada unidad, nunca puede exceder la carga de un armario individual, lo que hace que sea más fácil de encontrar y reparar las fugas, recuperar el refrigerante y restaurar el cargo.

Datos de una instalación real:

Se ha realizado el análisis de un supermercado equipado con unidades condensadas por agua que se encuentra en el centro de Italia; ésta alcanza una superficie de 900 m². A pesar de ser una renovación a un supermercado ya existente, los sistemas de refrigeración, calefacción y aire acondicionado han sido completamente actualizados, y por lo tanto desde el punto de vista de los sistemas, pueden ser considerados una nueva instalación.

El supermercado cuenta con 19 servicios refrigerados de media temperatura y 7 cámaras refrigeradas, 6 servicios de baja temperatura y 2 cámaras de baja temperatura; todo esto ha sido equipado con un total de 40 unidades condensadas por agua, con 30 compresores instalados.

Media temperatura	Servicios /Cámaras.	Evaporadores	Comps	Cooling Cap. [kW]	Baja temperatura	Servicios /Cámaras	Control devices	Comps	Cooling Cap. [kW]
<i>Vegetales</i>	2	2	2	3780	<i>Comida congelada</i>	6	6	6	9500
<i>Lácteos</i>	6	6	6	20800	<i>Cámaras</i>	2	4	4	4200
<i>Carne</i>	3	3	3	9700	<i>Total</i>	8	10	10	13700
<i>Pescado</i>	2	4	2	2780	Comp. cooling capacity	Evap T: -35°C		Evap T: -10°C	
<i>Charcuteria</i>	6	8	3	9080	<i>Pequeño</i>	800		2200	
<i>Cámaras</i>	7	7	4	13600	<i>Mediano</i>	1300		3600	
<i>Total</i>	26	30	20	59740	<i>Grande</i>	1700		4500	

Tabla 2: la capacidad frigorífica del compresor se refiere a las siguientes condiciones: $T_{cond} 35^{\circ}\text{C}$, $SBC 5K$, $T_{suct} 18^{\circ}\text{C}$.

El circuito de agua cuenta con una bomba de calor de múltiples funciones, con una capacidad de refrigeración de 100 kW , una bomba de calor agua / agua 23 kW , y un enfriador seco.

La carga de refrigerante en esta instalación es de alrededor de 120 kg de R404A , sin embargo, este valor incluye la necesidad de adaptarse a los armarios con receptores adicionales con fines experimentales. En funcionamiento constante, se estima que la carga de refrigerante requerida puede de hecho ser menos de 70 kg.

Adquisición y control de datos del sistema:

Cada armario está provisto de un controlador electrónico que gestiona las funciones normales (control de la temperatura, descongelación, de válvula de expansión electrónica, alarmas, etc.), con la adición de control de compresor de velocidad variable.

Cada controlador envía todos los datos de funcionamiento de cada unidad, al sistema de control, incluyendo valores como temperaturas de entrada y salida del aire, temperatura de descongelación,

la temperatura de descarga del compresor, presiones de aspiración y descarga, posición de la válvula de expansión electrónica, la velocidad del compresor, el estado de control y descongelación.

Fueron instalados analizadores de red con el fin de calcular la porción del consumo total de energía atribuible a los diferentes componentes en la instalación. Además, cuatro contadores de calor aportan información sobre la tendencia en el flujo de calor.

El sistema de adquisición recoge los datos de las unidades de refrigeración, y de los componentes del anillo, tales como: bombas de calor, sondas instaladas en el circuito de agua, y los medidores de electricidad y de calor, lo que permite un análisis detallado del funcionamiento del sistema .

Análisis:

El objetivo del análisis, es el uso los datos obtenidos durante los primeros meses de funcionamiento de la instalación de prueba, para así generar un modelo matemático que, una vez validado, se puede comparar con los modelos que definen los diferentes sistemas tradicionales.

Modelo de un supermercado con anillo de agua:

Los datos suministrados por el fabricante del compresor y los valores adquiridos en el campo en los tres meses a partir de febrero-abril se utilizaron para determinar, para cada unidad de refrigeración, un modelo de potencia consumida para cada capacidad de refrigeración entregada.

Los datos calculados se compararon con el consumo de energía registrado por los medidores de electricidad y los contadores de energía térmica. El modelo fue validado y por lo tanto, fue posible extrapolar el comportamiento de este tipo de instalación a través de todo un año y en diferentes climas.

Para los fines del modelo, se ha supuesto la instalación de un enfriador en el circuito de agua, y ha sido descartada la recuperación de calor.

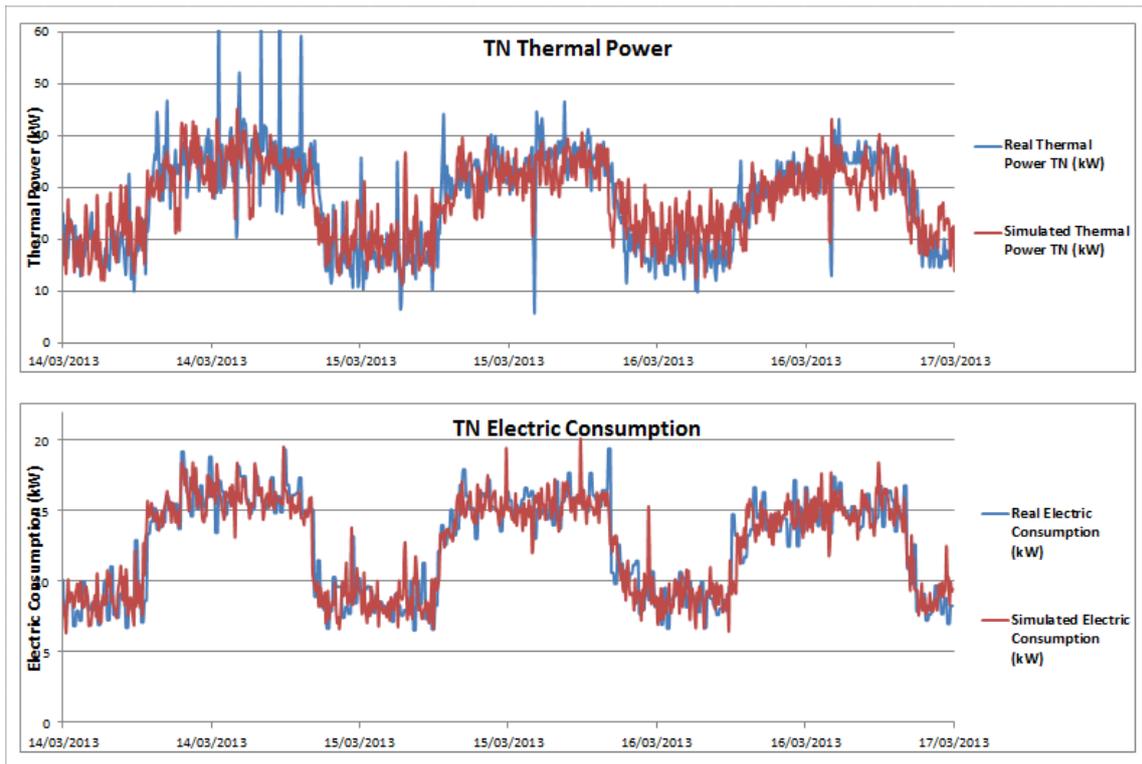


Figura 8: Gráfico que muestra la validación del modelo en relación con varios días en marzo.

Comparación con las soluciones tradicionales:

Se utilizaron varios tipos de supermercados tradicionales para la comparación frente a la solución del circuito de agua:

- R404A expansión directa con temperaturas de condensación y de evaporación fija (estándar).
- R404A expansión directa con temperaturas de condensación y evaporación flotantes (avanzado).
- Sistema Co2 subcritico en cascada R134a/CO2.
- Sistema de circuito de agua con compresores de velocidad fija.

La comparación se realizó teniendo en cuenta los supermercados con una superficie construida de 3.000 m²; los datos del supermercado real se extrapolaron en consecuencia.

Media temperatura Servicios Cooling capacity [W]			Baja temperatura Servicios Cooling capacity [W]		
Vegetales	6	10000	Comida congelada	24	35000
Lácteos	18	60000	Cámaras	6	20000
Carne	8	26000	Total	30	55000
Pescado	6	8000			
Charcutería	18	26000			
Cámaras	8	35000			
Total	64	165000			

Tabla 3: Unidades funcionando en el supermercado hipotético de referencia.

	M / L Comps	M / L Cool. Capacity [kW]	M / L Electric Power [kW]	M / L Evap T [kW]	Cond T [°C]
Solución con anillo de agua	72 / 30	170 / 60	79 / 34	Variable/Variable	20
Supermercado tradicional	6 / 3	200 / 64	87 / 53	-10 / -35	33
Supermercado avanzado	6 / 3	200 / 64	87 / 53	Variable/Variable	Variable
Cascada R134a/CO2	7 / 3	270 / 78	100 / 22	Variable/Variable	Variable

Tabla 4: Configuración de los sistemas usados para la comparación.

La comparación se basa en el perfil de temperatura anual de una ciudad europea, que se utiliza para calcular la carga térmica para las unidades³.

Estos perfiles se aplicaron a todos los tipos de supermercados considerados. Los modelos para sistemas con compresores a bordo se obtuvieron a partir de datos proporcionados por el fabricante del compresor y adquiridos en el campo, el resto de los datos se generaron utilizando el software Paquete de Cálculo II.

La comparación con un supermercado con circuito de agua con compresores a bordo de velocidad fija, se realiza aplicando la misma temperatura exterior y el mismo perfil de carga térmica, y luego determinar el encendido y apagado de los compresores en cada unidad, sin dejar de tener en cuenta las ineficiencias en funcionamientos transitorios.

El resultado es una tendencia en el consumo de energía de los compresores y los ventiladores del condensador para cada uno de los supermercados considerados.

³: Walker and Baxter (2003) $LF = [1 - (1 - \phi) \cdot ((30 - T_{out}) / (30 - 4))]$, where $LF = \% \text{ of nominal cooling capacity}$, $T_{out} = \text{outside temperature}$, $\phi = 0.66 \text{ for MT}$, $\phi = 0.8 \text{ for LT}$.

Comparación de la contribución directa al efecto invernadero:

Basado en datos publicados en la literatura, los datos se calcularon sobre la carga de refrigerante, fugas y la eliminación al final de la vida de trabajo para los diferentes tipos de sistemas simulados. Posteriormente, se estimó el potencial directo del calentamiento global.

	Refrigerante	Carga[kg]		Fugas [%]	Fugas [kg/year]	
Solución con anillo de agua	R404A	190		1%	1.9	
Supermercado tradicional	R404A	800		15%	120	
Supermercado avanzado	R404A	800		15%	120	
Cascada R134a/CO2	R134a/CO2	480	220	15%	72	33

Tabla 5: Carga de refrigerante y estimación de fugas en los sistemas usados para la comparación.

Resultados:

En base al análisis descrito en el capítulo anterior, los resultados en cuanto a consumo de energía se muestran en la siguiente tabla:

	Consumo energético [kWh/año]	Energía ahorrada [kWh/año]	% Ahorro energético	Dinero ahorrado [€year] MIN	Dinero ahorrado [€year] MAX
Anillo de agua con tec. BLDC	418500		-	-	-
Anillo de agua con on/off Comp	458200	39700	9%	5955	9925
Supermercado tradicional	592400	173900	29%	26085	43475
Supermercado avanzado	457000	38500	8%	5775	9625
Cascada R134a/CO2	466000	47500	10%	7125	11875

Tabla 6: comparación de eficiencia de los diferentes tipos de instalaciones, haciendo referencia sólo al consumo energético del compresor y condensador.

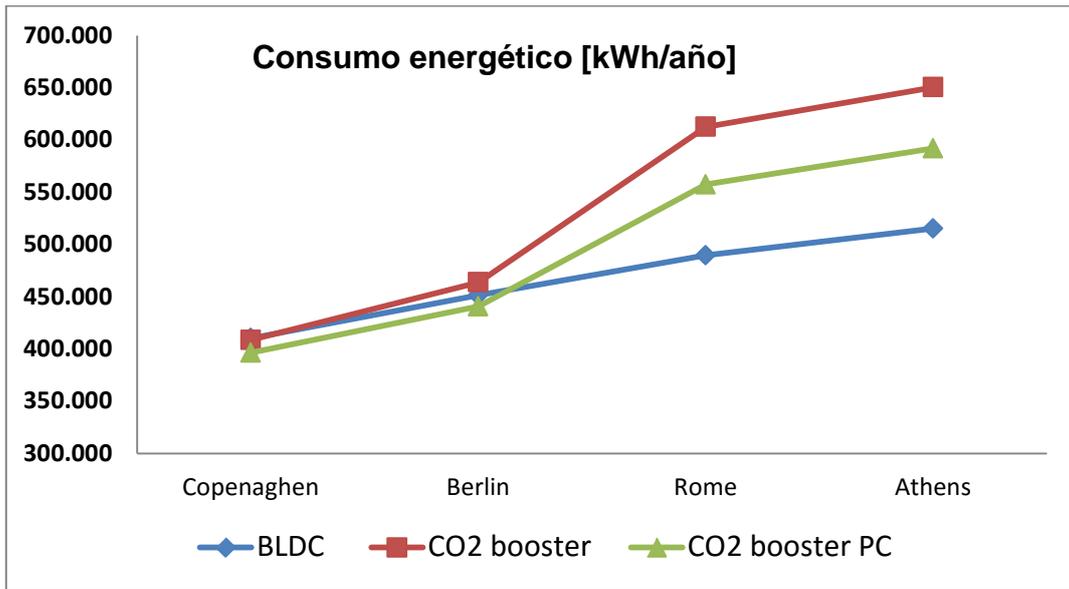
El ahorro de energía se refieren a la energía ahorrada por el sistema de circuito de agua con compresores BLDC, comparada con todas los otros tipos de instalaciones.

Para el cálculo de ahorro en euros, se consideran un coste de la electricidad mínimo de 0,15 €/ kWh , y un máximo de 0,25 €/ kWh.

Como se ha descrito anteriormente, la solución del circuito de agua es más eficiente no sólo en comparación con el supermercado estándar, en el que las temperaturas de condensación y de evaporación son fijas, sino también en comparación con las soluciones más avanzadas.

La posibilidad de tener temperaturas de evaporación independientes en cada unidad explica la ventaja en comparación con los sistemas centralizados con presión de aspiración flotante, en el que la unidad refrigerada en las condiciones menos favorables determina la presión de funcionamiento de toda la línea.

La ventaja de la solución con anillo de agua y compresores de velocidad variable BLDC, en comparación con los compresores de velocidad fija, puede explicarse teniendo en cuenta la optimización en la diferencia entre la temperatura de evaporación y la temperatura del aire en cada unidad refrigerada, y las ineficiencias de éstos durante el funcionamiento en periodos de transición de ciclos.



Type	Refrigerant	Copenhagen	Berlin	Rome	Athens
BLDC waterloop	R410A	410,230	451,415	489,609	515,176
Booster	R744	408,603	463,802	612,575	650,412
Booster PC	R744	396,345	440,612	557,443	591,875

Figura 9: Análisis de consumo energético [kWh/yr] en diferentes ciudades europeas.

En cuanto al impacto de las diferentes soluciones sobre el efecto invernadero, las tablas anteriores se pueden utilizar para calcular el TEWI más de diez años para cada sistema simulado, de acuerdo con la siguiente fórmula :

$$TEWI = GWP \cdot M \cdot L_{yr} \cdot N + GWP \cdot M \cdot (1 - \alpha) + E_{yr} \cdot \beta \cdot N$$

Donde los símbolos tienen los siguientes significados y valores hipotéticos:

- GWP = Potencial de Calentamiento Global R404A, 3800 kgCO₂/kg
- M = carga de refrigerante, (véase la Tabla 6).
- L_{yr} = fugas anuales, véase la Tabla 5 .
- N = años de vida del sistema, 10 años.

- Eyr = consumo anual de energía del sistema, consulte la Tabla 6.
- Las emisiones de $\beta = \text{CO}_2$ por kWh, 0,6 kgCO₂/kWh.
- α = porcentaje de recuperación de refrigerante en el final de la vida de trabajo, 95%.

	CO2 indirecto [t CO2/10 años]		CO2 directo [t CO2/10 años]		CO2 fin de vida [t CO2]		TEWI [t CO2/ 10 años]	
Anillo de agua	4425		72		36		4533	
Supermercado tradicional	5469	19%	4560	98%	152	76%	10181	55%
Supermercado avanzado	4656	5%	4560	98%	152	76%	9368	52%
Cascada R134a/CO₂.	4711	6%	936	92%	31	-15%	5557	20%

Tabla 7: Cálculo del TEWI a más de 10 años en el funcionamiento de los diferentes tipos de instalaciones usados para el estudio.

Es interesante observar cómo la reducción de la carga (hasta 80 %) y la disminución de las fugas de refrigerante (del 15% al 1 %), garantizado por la solución con anillo de agua, disminuye drásticamente el efecto directo del efecto invernadero. Este resultado, junto con los ahorros en el consumo de energía vistos anteriormente, trae una reducción significativa en TEWI de la instalación.

Conclusiones:

Se utilizaron los datos derivados de una instalación real de refrigeración comercial refrigerada con anillo de agua, para crear un modelo para ser aplicado como base para la comparación contra otros tipos de instalaciones.

Los cálculos muestran un ahorro estimado de energía en comparación con un supermercado estándar de 29 % , mientras que en comparación con las soluciones más avanzadas , el valor oscila entre 8 % y 10 %.

En base a los datos de la literatura sobre la carga y las fugas de refrigerante, se puede concluir que los sistemas con anillo de agua y compresores BLDC, hace que el efecto directo invernadero sea insignificante.

La solución del circuito de agua con compresores de velocidad variable de tipo BLDC en cada unidad puede aportar importantes ventajas en términos de eficiencia energética y reducción a la contribución del efecto invernadero.

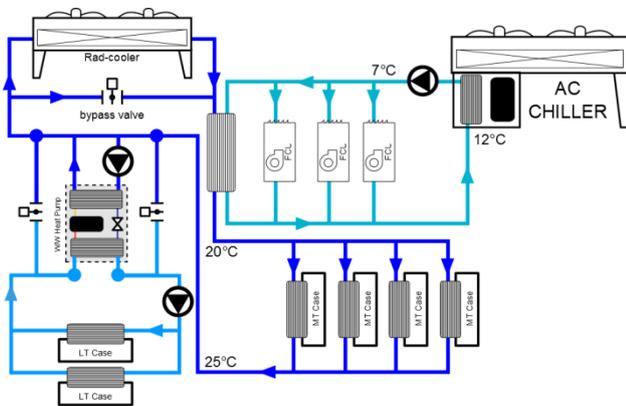
Tendencias de mercado: refrigerantes naturales en sistemas con anillo de agua y compresores BLDC.

PROPANO	CO2
PROS	PROS
<ul style="list-style-type: none"> • Refrigerante de alta eficiencia. • Las presiones de servicio son estándar. • Ideal para unidades pequeñas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bien aceptado en el mercado. • Sobrepasado el tema sobre presiones de uso. • Tendencias de innovación en curso.
CONTRAS	CONTRA
<ul style="list-style-type: none"> • Inflamabilidad • No hay uniformidad en las leyes de uso (UE ya nivel local, EN378, EN60079, ATEX Dir UE) • Limite de carga establecido en 150g, por ahora sólo suficiente para pequeñas islas de congelados. 	<ul style="list-style-type: none"> • La baja eficiencia en climas cálidos. • Componentes para trabajo en alta presión y capacidades más reducidas, generalmente más costosos. • Faltan compresores amplia gama.

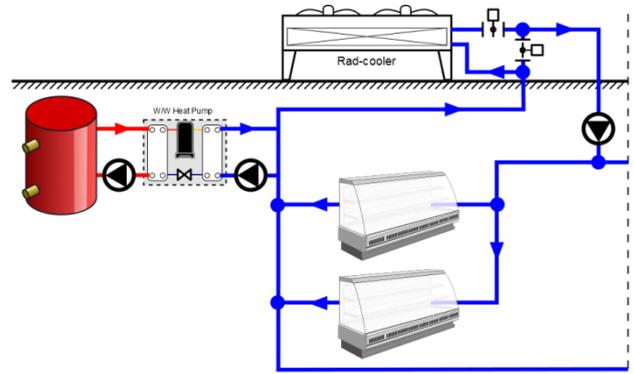
Tendencias de mercado: integración con sistemas de climatización.

El anillo de agua puede contribuir al aporte de calor a las bombas de calor que trabajan en modo invierno.

El anillo de agua se puede refrigerar con los sistemas de climatización en el periodo de verano.



Modo verano



Modo invierno