



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIERÍA  
INDUSTRIAL VALENCIA

**TRABAJO FIN DE MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

# **ANÁLISIS ENERGÉTICO, ECONÓMICO Y MEDIOAMBIENTAL DE DIFERENTES SISTEMAS DE CALEFACCIÓN CON RECUPERACIÓN DE CALOR EN SUPERMERCADOS**

AUTOR: ELISA BLASCO MUÑOZ

TUTOR: EMILIO JOSÉ SARABIA ESCRIVÀ

Curso Académico: 2020-21



## RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo el análisis de diferentes sistemas de calefacción en supermercados aprovechando parte del calor residual del sistema de refrigeración con CO<sub>2</sub>. El análisis de los diferentes sistemas planteados se compara con una instalación con caldera de gas natural como caso base, por ser este sistema el más habitual en las instalaciones.

El análisis tiene en cuenta tanto el consumo energético de las alternativas planteadas, como las emisiones asociadas y el coste económico de operación de cada opción. El estudio se realizará para tres zonas climáticas de España.

La demanda de calefacción del edificio se calculará con el programa DesignBuilder, que utiliza el EnergyPlus como motor de cálculo. El supermercado analizado tiene una superficie alrededor de 1500 m<sup>2</sup>.

El proyecto requiere estudiar los diferentes sistemas de climatización planteados como alternativa a la caldera de gas natural, así como analizar el sistema de recuperación instalado para la recuperación de energía del sistema de refrigeración por CO<sub>2</sub>. Los sistemas alternativos son el uso de bomba de calor con y sin depósito de acumulación en la recuperación; y producción de calor modificando las condiciones de funcionamiento del propio sistema de refrigeración de CO<sub>2</sub>.

**Palabras Clave:** recuperación de calor, refrigeración, supermercado, CO<sub>2</sub>, energía, eficiencia, emisiones, gases efecto invernadero.

## RESUM

El present treball té com a objectiu l'anàlisi de diferents sistemes de calefacció en supermercats aprofitant part de la calor residual del sistema de refrigeració amb CO<sub>2</sub>. L'anàlisi dels diferents sistemes plantejats es compara amb una instal·lació amb caldera de gas natural com a cas basí, per ser aquest sistema el més habitual en les instal·lacions.

L'anàlisi té en compte tant el consum energètic de les alternatives plantejades, com les emissions associades i el cost econòmic d'operació de cada opció. L'estudi es realitza per a tres zones climàtiques d'Espanya.

La demanda de calefacció de l'edifici es calcularà amb el programa DesignBuilder, que utilitza el EnergyPlus com a motor de càlcul. El supermercat analitzat té una superfície al voltant de 1500 m<sup>2</sup>.

El projecte requereix estudiar els diferents sistemes de climatització plantejats com a alternativa a la caldera de gas natural, així com analitzar el sistema de recuperació instal·lat per a la recuperació d'energia del sistema de refrigeració per CO<sub>2</sub>. Els sistemes alternatius són l'ús de bomba de calor amb i sense dipòsit d'acumulació en la recuperació; i producció de calor modificant les condicions de funcionament del propi sistema de refrigeració de CO<sub>2</sub>.

**Paraules Clau:** recuperació de calor, refrigeració, supermercat, CO<sub>2</sub>, energia, eficiència, emissions, gasos efecte d'hivernacle.

## **ABSTRACT**

The aim of this work is to analyse different heating systems in supermarkets using part of the waste heat from the CO<sub>2</sub> refrigeration system. The analysis of the different systems proposed is compared with an installation with a natural gas boiler as the base case, as this is the most common system in the installations.

The analysis takes into account both the energy consumption of the alternatives proposed, as well as the associated emissions and the economic cost of operation of each option. The study will be carried out for three climatic zones in Spain.

The heating demand of the building will be calculated with the DesignBuilder programme, which uses EnergyPlus as the calculation engine. The analysed supermarket has a surface area of about 1500 m<sup>2</sup>.

The project requires studying the different air conditioning systems proposed as an alternative to the natural gas boiler, as well as analysing the recovery system installed for energy recovery from the CO<sub>2</sub> refrigeration system. The alternative systems are the use of heat pump with and without storage tank in the recovery; and heat production by modifying the operating conditions of the CO<sub>2</sub> cooling system itself.

**Keywords:** heat recovery, refrigeration, supermarket, CO<sub>2</sub>, energy, efficiency, emissions, greenhouse gases.

# ÍNDICE

## DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFM

- Memoria
- Presupuesto
- Bibliografía

## ÍNDICE DE LA MEMORIA

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Objetivo general del trabajo .....	1
1.2. Estado del arte en refrigeración de supermercados.....	1
1.2.1. Ciclos termodinámicos para refrigeración .....	2
1.2.2. Tipos de ciclos de refrigeración.....	4
1.3. Normativa europea sobre gases refrigerantes y CO <sub>2</sub> .....	5
1.4. Opciones de refrigeración no contaminante .....	7
1.5. Estado del arte de calefacción y recuperación de calor en supermercados.....	8
Capítulo 2. Análisis de la demanda del supermercado .....	11
2.1. Datos climatológicos .....	11
2.1.1. Temperatura ambiente .....	11
2.1.2. Humedad relativa.....	12
2.2. Precios de energía .....	13
2.2.1. Precio de la electricidad .....	13
2.2.2. Precio del gas natural .....	15
2.3. Emisiones CO <sub>2</sub> .....	15
2.4. Estimación de la demanda calorífica.....	16
2.4.1. Características físicas del supermercado .....	17
2.4.2. Actividad del supermercado .....	22
2.4.3. Sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación natural.....	24
2.4.4. Resultados <i>DesignBuilder</i> .....	25
Capítulo 3. Desarrollo del ciclo de refrigeración y opciones de recuperación de calor.....	29
3.1. Esquema ciclo refrigeración con CO <sub>2</sub> y recuperación de calor .....	29

3.2. Descripción del modelo.....	35
3.3. Características del sistema de refrigeración .....	36
3.4. Sistemas de calefacción analizados.....	37
3.4.1. Caso base.....	39
3.4.2. Caso 1 .....	39
3.4.3. Caso 2 .....	39
3.4.4. Caso 3 .....	39
3.4.5. Caso 4 .....	39
3.4.6. Caso 5 .....	39
3.4.7. Caso 6 .....	39
Capítulo 4. Resultados.....	41
4.1. Resultados energéticos .....	41
4.1.1. Calor recuperado.....	41
4.1.2. Consumo sistema de refrigeración y equipos auxiliares.....	44
4.1.3. COP .....	46
4.2. Resultados económicos.....	49
4.3. Resultados medioambientales .....	50
4.4. Conclusiones.....	52

**ANÁLISIS ENERGÉTICO, ECONÓMICO Y  
MEDIOAMBIENTAL DE DIFERENTES SISTEMAS DE  
CALEFACCIÓN CON RECUPERACIÓN DE CALOR EN  
SUPERMERCADOS**

MEMORIA



# **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. OBJETIVO GENERAL DEL TRABAJO**

El presente Trabajo de Final de Máster (TFM) es un trabajo académico en el que se trata de demostrar los conocimientos adquiridos en el máster e investigar y ampliar algunos de ellos.

El propósito final del trabajo es realizar una comparativa de diferentes sistemas de calefacción en un supermercado y la posibilidad de recuperación de calor del sistema de refrigeración. El estudio se realiza para tres zonas climáticas de España. Se van a comparar diferentes opciones de recuperación del calor para la climatización alternativamente a la cadera de gas natural. Estas opciones son la utilización de una bomba de calor con y sin depósito de acumulación en la recuperación; y la producción de calor modificando las condiciones de funcionamiento del propio sistema de refrigeración de CO<sub>2</sub>. El estudio se va a realizar para tres zonas climáticas diferentes de España, concretamente Vitoria, Valencia y Sevilla, y en él se va a tener en cuenta el consumo energético, las emisiones de gases contaminantes y el coste económico de operación de cada uno de los casos planteados para un año completo.

Para poder estudiar la recuperación de calor del sistema de refrigeración es necesario conocer la demanda de calor que tiene el supermercado a lo largo de un año. La obtención de esta demanda energética se ha realizado con el software *DesignBuilder*, que permite realizar simulaciones energéticas y ambientales de edificios, y evaluar los consumos de energía, condiciones de confort y emisiones de carbono. Una vez conseguida la demanda calorífica anual del edificio, se utilizará una herramienta web (Sarabia, 2020) para analizar cada una de las opciones de recuperación del calor energética, económica y medioambientalmente.

Se van a estudiar alternativas para los sistemas de calefacción de los supermercados con ciclos refrigerantes con CO<sub>2</sub> porque estos sistemas con refrigerantes naturales son el futuro de la refrigeración de supermercados, y ya se están implementando sobre todo en el norte de Europa, donde el clima es más frío. Tal y como se explica posteriormente, en climas cálidos estos sistemas de refrigeración tienen un COP más bajo, debido a las altas temperaturas de condensación. La recuperación de calor es importante, pues los sistemas son más eficientes, malgastando menos energía y emitiendo menos gases contaminantes.

## **1.2. ESTADO DEL ARTE EN REFRIGERACIÓN DE SUPERMERCADOS**

En este apartado se va a introducir al lector en el contexto de la refrigeración de supermercados, se va a explicar de manera global el funcionamiento de los sistemas de refrigeración y se van a analizar las opciones disponibles actualmente para este uso.

Los supermercados utilizan grandes cantidades de energía para su funcionamiento, forman parte de los edificios con consumos energéticos específicos más altos (energía por superficie), es decir, hacen un uso intensivo de la energía (Karampour *et al.*, 2016). De este consumo, el 35 – 50% va destinado a los sistemas de refrigeración, siendo este el consumo de electricidad más elevado. El resto, se dedica a calefacción, iluminación, ventilación y aire acondicionado, entre otros. Los supermercados tienen un gran impacto medioambiental, son grandes emisores potenciales de gases de efecto invernadero, de forma directa e indirecta:

- **Efecto indirecto:** emisiones derivadas del consumo eléctrico que se ha mencionado antes. Para producir la energía que estos establecimientos requieren, se emiten a la atmósfera grandes cantidades de gases de efecto invernadero.
- **Efecto directo:** emisiones por la utilización de gases fluorados, refrigerantes HFCs con alto poder de calentamiento atmosférico (PCA), como pueden ser el R404A, R134a... (Sánchez, 2018)

Para comprender mejor estos efectos, es necesario conocer primero algunos términos:

PCA: potencial de calentamiento atmosférico. Es el calentamiento atmosférico que tiene un gas de efecto invernadero respecto al del CO<sub>2</sub>. Se calcula como el potencial de calentamiento de un kg de ese gas durante 100 años respecto al de un kg de CO<sub>2</sub>.

Gases fluorados de efecto invernadero: hidrofluorocarburos, perfluorocarburos, hexafluoruro de azufre y otros gases de efecto invernadero que contienen flúor.

Existen dos niveles de temperatura principales en un supermercado: los alimentos refrigerados se conservan al nivel de media temperatura, entre 1 y 14°C, y los alimentos congelados se conservan a baja temperatura, entre -12 y -18°C. Para conseguir estas temperaturas en las neveras y congeladores, el refrigerante debe evaporarse a temperaturas más bajas, entre -15°C y 5°C para media temperatura y entre -30°C y -40°C para baja temperatura.

### 1.2.1. Ciclos termodinámicos para refrigeración

Como ya es conocido, los supermercados utilizan ciclos de refrigeración para conseguir dichas temperaturas. En estos ciclos, el fluido refrigerante absorbe calor del foco frío, en caso de los supermercados, dos focos, neveras y congeladores, y cede el calor a un medio a temperatura mayor. Para conseguirlo se debe aportar trabajo mecánico al ciclo. En la imagen que se ve a continuación se puede observar un diagrama presión – entalpía del ciclo simple de refrigeración, para poder comprender mejor el funcionamiento de estos ciclos.

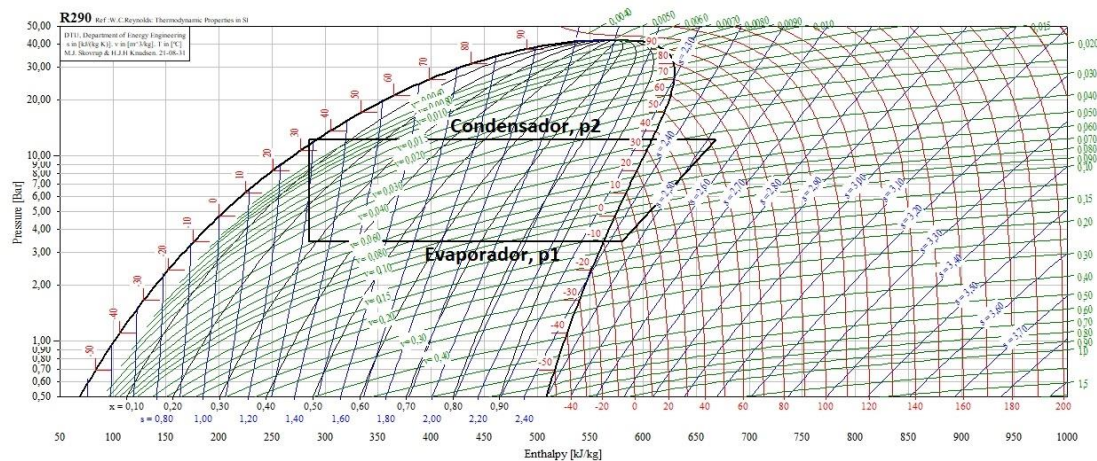


Imagen 1. Ciclo simple de refrigeración

En el evaporador el refrigerante absorbe calor del foco frío, como consecuencia se evapora. Esto se produce a presión constante, próxima a la presión atmosférica. Este vapor saturado que sale del evaporador se comprime en un compresor hasta alcanzar la presión  $p_2$ . Como resultado del aumento de presión, el vapor aumenta su temperatura por encima de la del foco caliente, de manera que cuando este vapor llega al condensador, se enfría a presión constante cediendo calor al foco caliente. La cesión de calor provoca que el vapor condense, y llegue al estado de líquido saturado. A continuación el líquido saturado se introduce en una válvula de expansión isoentálpica, que devuelve al fluido a la presión  $p_1$  y a un estado de mezcla líquido y vapor. En estas condiciones, el refrigerante vuelve a comenzar el ciclo en el evaporador.

Una vez comprendido cómo funciona un ciclo simple de refrigeración, se pueden añadir mejoras para que el ciclo resulte más eficiente. Por ejemplo, el consumo energético de estos ciclos corresponde con el trabajo mecánico que requiere el compresor, y el trabajo que se debe aportar es mayor cuanto mayor es el volumen específico del refrigerante, que para una misma presión, aumenta con la temperatura. De manera que para reducir el trabajo de compresión necesario, se puede dividir el proceso de compresión en dos etapas con un enfriamiento intermedio. En la segunda etapa el refrigerante estará a una temperatura más baja, su volumen específico será menor y por tanto el trabajo que deberá aportarse al compresor también será menor. Este tipo de ciclos se denominan de doble compresión.

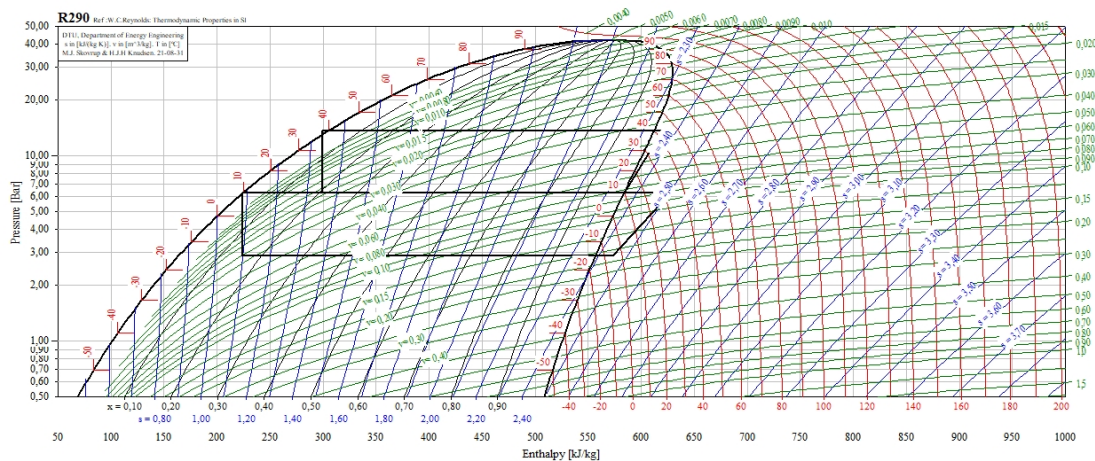


Imagen 2. Ciclo doble compresión

### 1.2.2. Tipos de ciclos de refrigeración

En los supermercados se pueden encontrar diferentes tipos de sistemas de refrigeración, dependiendo de la cantidad de productos refrigerados o congelados y del tamaño de la superficie. Se van a explicar los tres más comunes de menor a mayor tamaño:

- **Sistemas independientes o autónomos:** el sistema de refrigeración se encuentra integrado en cada una de las neveras o congeladores existentes, y el calor que ceden los condensadores se expulsa al interior del supermercado. Como su propio nombre indica, las vitrinas no dependen unas de otras.
- **Unidades de condensación:** estos sistemas sitúan los equipos en una sala de máquinas, normalmente uno o dos compresores y un condensador. Pueden refrigerar al mismo tiempo varias vitrinas.
- **Sistemas centralizados:** son los más utilizados. El sistema central de refrigeración se encuentra situado en una sala de máquinas, como la opción anterior, pero de un tamaño mayor. Hay dos tipos de sistemas centralizados:
  - **Sistemas directos:** son los sistemas de refrigeración más tradicionales. En ellos, los ciclos de media y baja temperatura están totalmente separados, y el fluido refrigerante es el mismo a lo largo de todo el ciclo, es decir, el refrigerante circula por los compresores, las vitrinas y el condensador. Esto hace que las cargas de refrigerante sean muy elevadas.
  - **Sistemas indirectos:** se idearon para reducir la carga de refrigerante necesaria en los sistemas anteriores. En ellos, los bucles de media y baja temperatura también están separados, pero en cada uno de los bucles hay un circuito primario en la parte de condensación y uno secundario en la parte de evaporación, tal y como se muestra en las siguientes figuras. Se puede utilizar el mismo refrigerante para ambas etapas del ciclo, o uno diferente para cada una de las etapas.

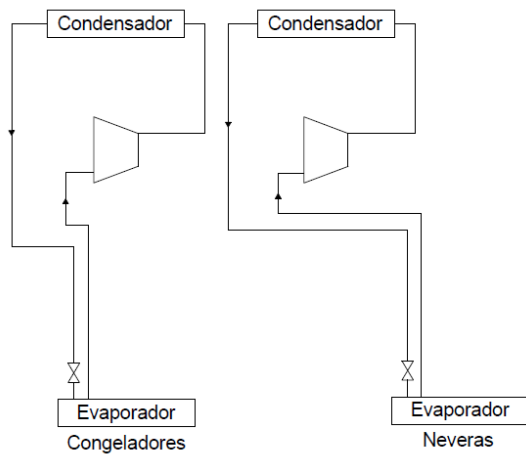


Imagen 3. Sistema de refrigeración directo

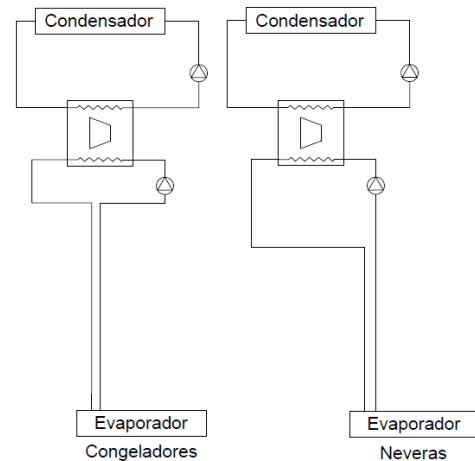


Imagen 4. Sistema de refrigeración indirecto

Los sistemas centralizados son los más utilizados en los supermercados de la unión europea, el problema es que se consumen grandes cantidades de HFCs, como por ejemplo el R404A. Este refrigerante es una mezcla prácticamente azeotrópica de varios hidrofluorocarbonos, es decir, una mezcla que se comporta como si únicamente estuviese formada por un componente. El R404A ha sido tan utilizado debido a que posee buenas propiedades termodinámicas y eficiencia energética y se obtienen muy buenos resultados para los dos niveles de temperatura necesarios en un supermercado, además de no ser tóxico ni inflamable, pero a su vez tiene un PCA de 3922, por lo que sus emisiones son muy dañinas para el medio ambiente (Mota-Babiloni *et al.*, 2015).

La necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, que se reflejan en la normativa europea vigente, han hecho que se empiecen a comercializar sistemas que sustituyan total o parcialmente la utilización del refrigerante R404A y todos aquellos con PCAs elevados.

### 1.3. NORMATIVA EUROPEA SOBRE GASES REFRIGERANTES Y CO<sub>2</sub>

Con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y avanzar hacia una industria hipocarbónica, la unión europea determinó en 2014 que todos los países desarrollados deberían reducir las emisiones de gases de efecto invernadero entre un 80 y un 90% con respecto a las de 1990 para el año 2050. Tomando como referencia el año 2005, se debe conseguir una reducción del 60% en las emisiones de gases fluorados de efecto invernadero para el año 2030. (UE 517/2014, 2014)

El reglamento europeo Nº 517/2014 sobre los gases fluorados de efecto invernadero, o más comúnmente conocido como “normativa F-Gas”, establece una serie de prohibiciones de utilización y medidas a adoptar sobre estos gases para conseguir el objetivo de reducción de emisiones del 80-90% en el año 2050. Hay varios puntos en este reglamento que afectan directamente a los refrigerantes que actualmente se utilizan en los equipos de refrigeración de supermercados, motivo por el cuál en los últimos años se están estudiando diferentes sistemas frigoríficos con refrigerantes menos contaminantes.

En el Anexo III de esta normativa se establecen las prohibiciones de comercialización de los gases fluorados de efecto invernadero. El punto 11 de este anexo es el que más afecta al sector de la refrigeración de grandes superficies:

Productos y aparatos		Fecha de la prohibición
Frigoríficos y congeladores para uso comercial (aparatos sellados herméticamente)	Que contienen HFC con PCA $\geq 2500$	1 de enero de 2020
	Que contienen HFC con PCA $\geq 150$	1 de enero de 2022

**Tabla 1. Información extraída de la norma UE 517/2014, 2014**

Se prohíbe la utilización de refrigerantes con PCA  $\geq 150$  en sistemas de refrigeración centralizados de más de 40 kW, exceptuando los ciclos en cascada, en los que en el circuito primario se podrán seguir utilizando refrigerantes con PCA  $\leq 1500$ .

A raíz de esta normativa europea los fabricantes de equipos de refrigeración han empezado a utilizar refrigerantes menos contaminantes o naturales, como el dióxido de carbono, el amoníaco, el propano... todos ellos con PCAs bajos. Muchos países, sobre todo del norte de Europa, ya utilizan ciclos con CO<sub>2</sub> (R744) como refrigerante, ya que tiene muy buenas propiedades termodinámicas.

#### **Ventajas CO<sub>2</sub>**

- Tiene un PCA = 1, bajo impacto ambiental.
- No es inflamable ni tóxico.
- Alta capacidad volumétrica de enfriamiento, es decir, con poca cantidad de refrigerante se consigue una eficacia elevada. Esto hace que los equipos puedan ser más compactos.
- Gas de alta densidad, los intercambios de calor son muy eficientes.
- Económico.

#### **Desventajas CO<sub>2</sub>**

- Temperatura crítica baja (30,97°C) y presión crítica alta (72,8°C)
- Su alta densidad requiere un consumo eléctrico en el compresor elevado.

Se puede trabajar con el CO<sub>2</sub> de forma subcrítica o transcítica. Los ciclos subcríticos son aquellos en los que la descarga del compresor está por debajo de la presión crítica del CO<sub>2</sub>, y por tanto es condensable, mientras que en los ciclos transcíticos la descarga del compresor es superior a la presión crítica y la temperatura es muy elevada. Esto ocasiona que el CO<sub>2</sub> sobrecalentado tenga que enfriarse en un enfriador de gas, en lugar de condensarlo directamente.



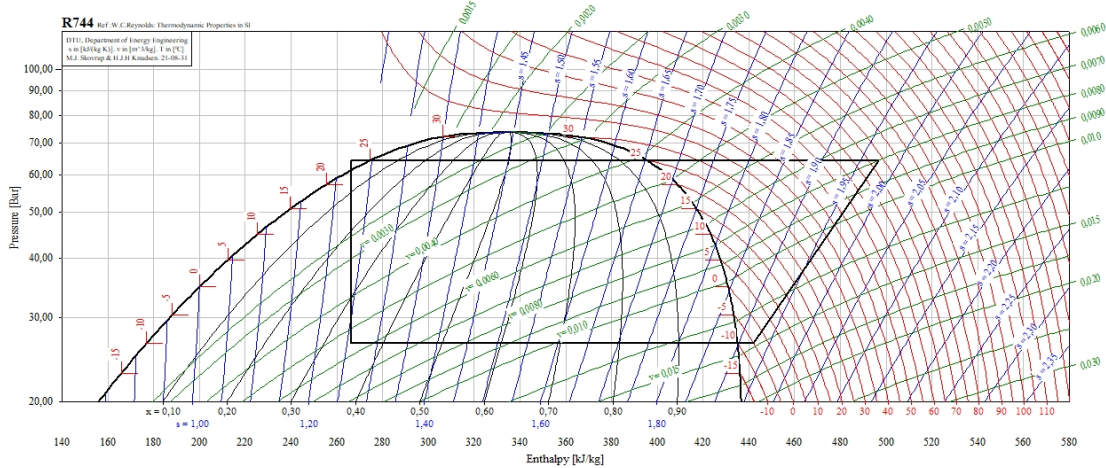


Imagen 5. Ciclo de CO2 subcrítico

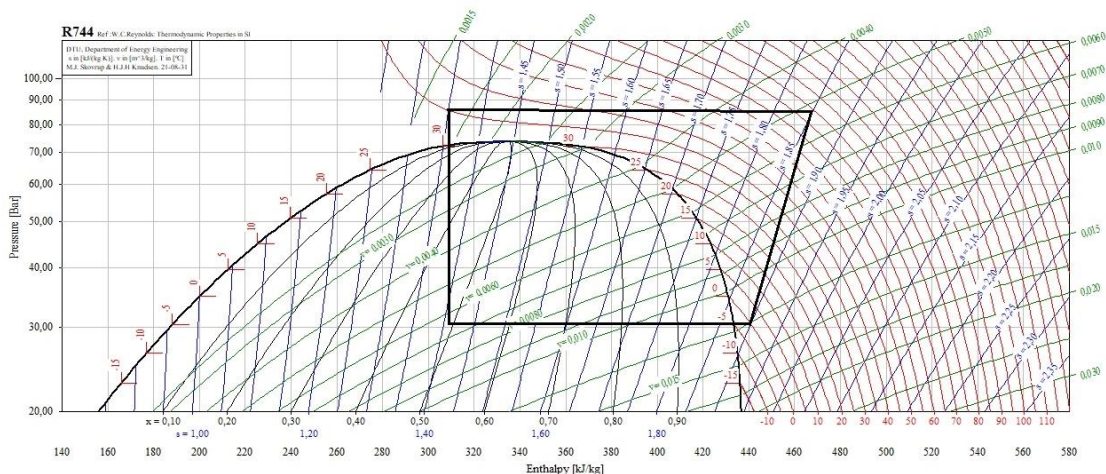


Imagen 6. Ciclo de CO2 supercrítico

Los sistemas subcríticos tienen relaciones de presiones más bajas y se utilizan en muchos sistemas en cascada en la parte de frío negativo, junto con algún HFC como el R-134a, o amoníaco para la parte de frío positivo. El aspecto negativo es que estos sistemas son complejos y necesitan un intercambiador de calor. Por otra parte, los sistemas transcíticos son más sencillos y eficientes (mayor COP) cuando la temperatura ambiente no es muy alta, aunque se debe tener en cuenta que las presiones alcanzadas son elevadas.

Puesto que el dióxido de carbono es el refrigerante natural que más se está investigando y utilizando, es en el que se centra este trabajo académico. En el siguiente punto se van a explicar los diferentes sistemas en los que se puede utilizar y algunas características de cada uno de ellos.

#### 1.4. OPCIONES DE REFRIGERACIÓN NO CONTAMINANTE

Tal y como se ha explicado en el punto 1.2, los sistemas de refrigeración de supermercados necesitan 2 niveles de evaporación, ente 1 y 14°C para neveras y entre -12 y -18°C para congeladores. En este punto se van a analizar los sistemas que permiten la utilización de gases

refrigerantes naturales o que generan menos emisiones de gases de efecto invernadero, y que actualmente se están empezando a utilizar debido a la normativa europea que restringe la comercialización de algunos gases fluorados.

En este punto se van a analizar los sistemas existentes que permiten el uso del CO<sub>2</sub> como refrigerante, por orden de aparición:

- **Sistema indirecto con CO<sub>2</sub> como fluido secundario:** una ventaja del CO<sub>2</sub> sobre los fluidos secundarios utilizados tradicionalmente es que su viscosidad es menor, por lo que el consumo de electricidad en la bomba del circuito secundario se reduce. En estos sistemas se utiliza el CO<sub>2</sub> en la parte de baja temperatura, pues la presión suele ser menor que la presión crítica del dióxido de carbono.
- **Sistema de CO<sub>2</sub> en cascada:** en estos sistemas, el CO<sub>2</sub> se utiliza tanto en la parte de baja como de media temperatura, y el calor que se absorbe se disipa en un ciclo diferente, en el que se pueden utilizar refrigerantes con PCA elevado. Sin embargo, tener un ciclo extra implica utilizar un intercambiador de calor, lo que resta eficiencia al sistema.
- **Sistema con CO<sub>2</sub> transcrito:** es el sistema más novedoso con utilización de CO<sub>2</sub>, el dióxido de carbono se utiliza como refrigerante en las partes de baja y media temperatura, pero sin disponer de un circuito de alta temperatura con otro refrigerante como en el caso anterior. El ciclo trabaja de forma subcrítica o transcrito dependiendo de la temperatura de condensación.

La eficiencia o COP depende mucho de la temperatura ambiente. Cuando el ciclo funciona en modo transcrito, la temperatura del refrigerante es más elevada que la temperatura crítica, y si el supermercado está ubicado en un lugar con clima cálido, durante varios meses del año la temperatura ambiente será muy similar o mayor a la temperatura del refrigerante, por lo que este no se va a poder enfriar sin la acción de un enfriador de gas. Por este motivo se están instalando principalmente en climas fríos, con disipación del calor directamente al aire ambiente, donde el funcionamiento es prácticamente subcrítico. En estos climas los sistemas de refrigeración con CO<sub>2</sub> se están utilizando con muy buenos resultados, buena eficiencia y reducción considerable de emisiones de gases de efecto invernadero (Gullo *et al.*, 2017).

Con la intención de adaptar este sistema y sus prometedoras características a los climas cálidos, en este trabajo se va a analizar un ciclo de refrigeración con CO<sub>2</sub> transcrito en tres ambientes relativamente cálidos como los de Vitoria, Valencia y Sevilla, y para conseguir mejorar la eficiencia, se van a estudiar seis casos de recuperación de calor que ayudarán a aprovechar mejor la energía generada por este ciclo.

## 1.5. ESTADO DEL ARTE DE CALEFACCIÓN Y RECUPERACIÓN DE CALOR EN SUPERMERCADOS

Después de la refrigeración, la calefacción es uno de los gastos energéticos más elevados en supermercados, pues se necesita calentar el espacio de venta, oficinas y vestuarios en invierno, y agua caliente sanitaria (ACS) para preparar comidas y limpieza.

Tradicionalmente, los métodos que se utilizan para calefacción y ACS son calderas de gas o eléctricas, y unidades de tratamiento de aire (UTA) para distribuir el aire caliente por la zona de ventas. Otros métodos más eficientes son las bombas de calor, la cogeneración o trigeneración



de electricidad, calefacción y refrigeración y los paneles solares térmicos, aunque sin duda el sistema más rentable energética, económica y medioambientalmente es utilizar el calor residual del sistema de refrigeración (Karampour *et al.*, 2016).

El calor extraído del sistema de refrigeración puede cubrir total o parcialmente las necesidades caloríficas de los supermercados, dependiendo de la temperatura y humedad exterior, pues determinarán las demandas de energía del edificio. Para ello es necesario contar con un diseño y control adecuados. Esto es difícil si los diversos sistemas del edificio (refrigeración, ventilación, calefacción...) son instalados por diferentes empresas.

Normalmente para la recuperación de calor en ciclos de refrigeración que utilizan HFCs se usa un método denominado “controlar la presión en cabeza”, y que consiste en elevar la presión de condensación para que el fluido refrigerante que circula por el condensador tenga la temperatura requerida para el suministro del sistema de calefacción. El modo de recuperar calor en ciclos transcíticos de CO<sub>2</sub> consiste en enfriar el refrigerante a la salida del compresor, donde ha alcanzado una temperatura elevada, por ejemplo con un “des-sobrecalentador”. El calor que se recupera se encuentra a una temperatura muy alta, y se le pueden dar varios usos, como utilizarlo para calentar agua caliente sanitaria (70 - 50 °C), calentar directamente una estancia (50 - 40 °C) o utilizarlo en una bomba de calor. (Sawalha, 2012)

En el presente estudio, se va a analizar la recuperación de calor con la ayuda de calentadores eléctricos, bombas de calor y un tanque de almacenamiento.



## **CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE LA DEMANDA DEL SUPERMERCADO**

Para evaluar los diferentes métodos de recuperación de calor en un sistema de refrigeración con CO<sub>2</sub> transcrito, se va a utilizar el modelo de instalación de CO<sub>2</sub> desarrollado por Sarabia *et al.* (Sarabia *et al.*, 2019) implementado en javascript (Sarabia, 2020) en el que se debe introducir cierta información sobre el clima de la ciudad donde está ubicado el supermercado, los costes de la energía, la cantidad de CO<sub>2</sub> que se produce y la demanda de calor que tiene el supermercado. Estos datos se deben introducir en formato CSV, con un valor para cada hora del año, es decir, archivos con 8760 valores.

En este segundo capítulo se va a mostrar dicha información y se va a explicar cómo se ha obtenido, empezando por los datos climatológicos.

### **2.1. DATOS CLIMATOLÓGICOS**

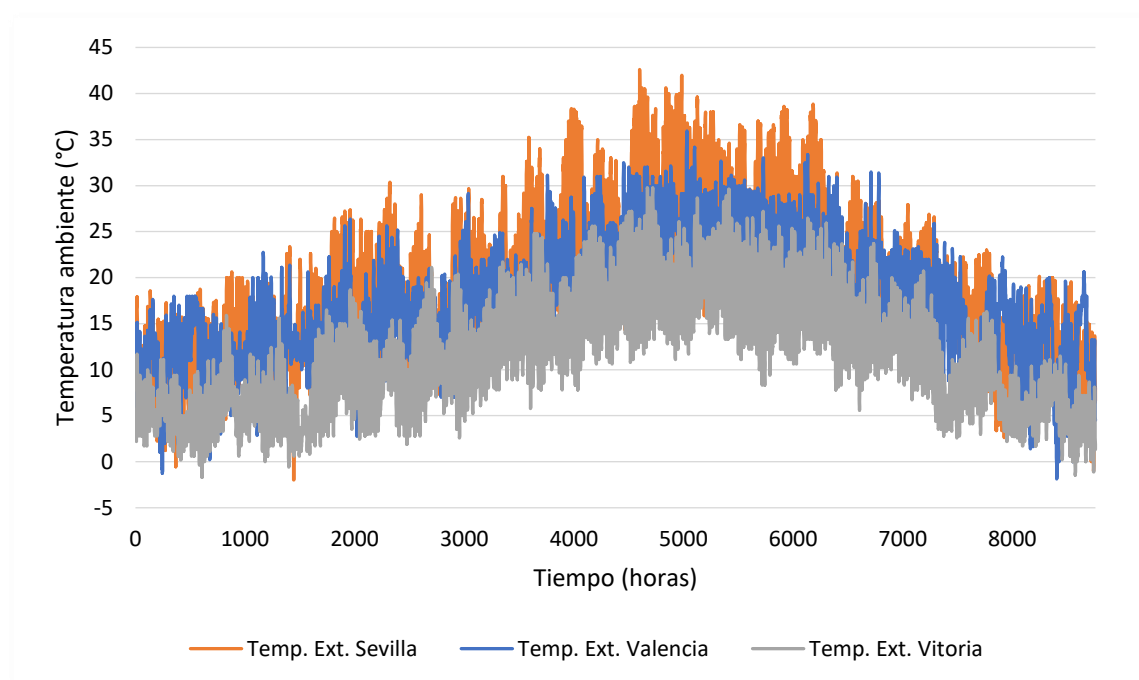
La información meteorológica necesaria para los cálculos posteriores es la temperatura exterior y la humedad relativa de cada una de las ciudades dónde va a estar ubicado el supermercado de estudio. La demanda energética de los sistemas de refrigeración y calefacción está íntimamente relacionada con el clima de la localidad donde se encuentren, ya que cuanto más baja sean la temperatura y la humedad exterior, disminuirá la demanda frigorífica y aumentará la demanda de calefacción, y viceversa.

Con el objetivo de obtener datos fiables, se ha utilizado la base de datos meteorológica de *EnergyPlus*, programa que se utiliza para modelar el uso de agua y energía de edificios y que cuenta con una base de datos climáticos de más de 2100 ciudades. Los ficheros de esta base de datos se descargan en formato epw (Energy Plus Weather), que son fácilmente convertibles a Excel, dónde se pueden representar de manera gráfica para obtener una visión más clara de la información.

#### **2.1.1. Temperatura ambiente**

La temperatura exterior de la localidad dónde se encuentra el edificio a estudiar es una variable muy determinante a la hora de analizar el comportamiento termodinámico de un ciclo transcrito de CO<sub>2</sub>. Tal y como se ha mencionado anteriormente, actualmente los ciclos de refrigeración que operan íntegramente con CO<sub>2</sub> se están instalando en países con temperaturas exteriores bajas, como los nórdicos. En países con un clima más cálido como puede ser España, la temperatura de condensación es más elevada que la crítica.

A continuación se muestra en una gráfica la temperatura ambiente de cada una de las tres ciudades en las que se va a realizar el estudio, a lo largo de un año tipo.



**Gráfica 1. Evolución de la temperatura ambiente a lo largo de un año en Sevilla, Valencia y Vitoria**

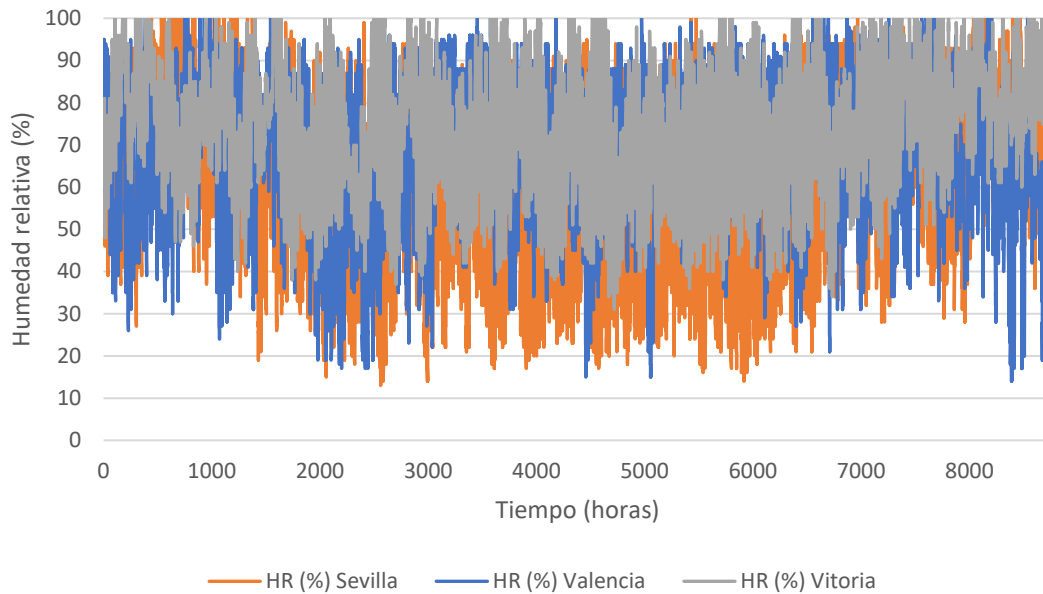
Hay una clara diferencia entre las temperaturas de las tres ciudades a lo largo de todo un año tipo, en ocasiones la diferencia entre temperaturas a una misma hora del año es de más de 20°C.

	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)
<b>Sevilla</b>	42,6	-2
<b>Valencia</b>	35,9	-1,8
<b>Vitoria</b>	29,8	-1,7

**Tabla 2. Temperaturas máximas y mínimas en un año tipo en Sevilla, Valencia y Vitoria**

### 2.1.2. Humedad relativa

La humedad relativa es la cantidad de vapor de agua que contiene el aire respecto a la cantidad máxima que podría contener a una determinada temperatura (saturación) y se expresa en tanto por cien. De las tres ciudades estudiadas, Vitoria se encuentra en el norte de España, tiene un clima en el que son muy habituales los días nublados y lluviosos por lo que es de esperar que su humedad relativa a lo largo del año sea alta. De Valencia también se puede esperar una humedad relativamente elevada, ya que es una ciudad costera, mientras que Sevilla, situada al sur y sin costa, la tendrá más baja.



**Gráfica 2. Evolución de la humedad relativa a lo largo de un año en Sevilla, Valencia y Vitoria**

Al observar la gráfica se puede ver cómo hay una diferencia clara entre la humedad relativa de Vitoria, ciudad del norte de España, con la humedad relativa más elevada y Sevilla, ciudad del sur, con la más baja. La humedad relativa de Valencia se encuentra la mayoría del tiempo entre las dos anteriores.

## 2.2. PRECIOS DE ENERGÍA

Uno de los objetivos del presente trabajo es evaluar económicamente las estrategias de recuperación del calor de un sistema de refrigeración con CO<sub>2</sub>, para lo cual se deben conocer los precios de las fuentes de energía que se van a utilizar en los sistemas de refrigeración y calefacción, electricidad y gas natural. De esta manera se podrá estimar qué estrategia de recuperación de calor permite obtener mayores ahorros.

### 2.2.1. Precio de la electricidad

El precio de la electricidad no es constante en el tiempo, depende del mes y la hora a la que se consume, existen periodos tarifarios en los que se dividen los días y son los que determinan los precios de la electricidad. Se tendrán unos periodos u otros dependiendo del tipo de tarifa que se tenga contratada, que se deberá elegir de acuerdo con la potencia que se vaya a necesitar y el nivel de tensión. En los últimos meses se ha adoptado una tarificación nueva, que entró en vigor el pasado 1 de junio y es la que se va a utilizar en este trabajo para calcular el coste de la luz.

Puesto que no se tiene información sobre las tarifas reales que contratan los supermercados, se va a realizar una estimación con el objetivo de poder establecer los costes de la energía eléctrica que tendrá el supermercado que se está estudiando.

Teniendo en cuenta que los supermercados son edificios con un gran consumo de energía y poseen numerosos equipos funcionando a la vez, se va a asumir que la potencia contratada será mayor de 15 kW, y que la conexión se realizará en baja tensión,  $V < 1$  kV. En la tarificación antigua

Análisis energético, económico y medioambiental de diferentes sistemas de calefacción con recuperación de calor en supermercados

esto se correspondía con una tarifa 3.0A, con tres períodos de energía y tres de potencia, sin embargo, con las nuevas tarifas, la 3.0A pasa a denominarse 3.0TD y aumenta los períodos tanto de energía como de potencia a seis. Para ilustrar de forma más clara las horas que tendrán diferentes precios, se ha realizado la siguiente tabla.

Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Sábados, domingos y festivos
00:00 - 01:00	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
01:00 - 02:00	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
02:00 - 03:00	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
03:00 - 04:00	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
04:00 - 05:00	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
05:00 - 06:00	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
06:00 - 07:00	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
07:00 - 08:00	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
08:00 - 09:00	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6
09:00 - 10:00	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6
10:00 - 11:00	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6
11:00 - 12:00	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6
12:00 - 13:00	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6
13:00 - 14:00	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6
14:00 - 15:00	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6
15:00 - 16:00	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6
16:00 - 17:00	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6
17:00 - 18:00	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6
18:00 - 19:00	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6
19:00 - 20:00	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6
20:00 - 21:00	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6
21:00 - 22:00	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6
22:00 - 23:00	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6
23:00 - 00:00	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6

Tabla 3. Períodos en las nuevas tarifas eléctricas

Para cada día se distinguen tres tramos diferenciados; las horas llano, valle y punta, de las que las horas punta son las de coste más elevado.

Tramo	Horas
Valle	00:00 – 08:00
Llano	08:00 – 09:00, 14:00 – 18:00, 22:00 – 00:00
Punta	09:00 – 14:00, 18:00 – 22:00

Tabla 4. Tramos horarios valle, llano y punta

Los precios de la energía de cada periodo se van a tomar de una comercializadora española, Naturgy, y son los siguientes:

Periodo	Término de energía (€/kWh)
1	0,194018
2	0,174682
3	0,145669
4	0,130990
5	0,119286
6	0,118929

Tabla 5. Precios término energía Naturgy

### 2.2.2. Precio del gas natural

En el supermercado que se va a analizar, la calefacción en el caso base funciona con gas natural, por lo que para determinar los ahorros que se obtienen con la recuperación de calor, es necesario conocer el precio del combustible.

Al igual que en el coste de la electricidad, existen diferentes tarifas dependiendo del consumo de cada cliente. En el mercado libre del gas natural se puede elegir entre las tarifas 3.1 y 3.2; la tarifa 3.1 es adecuada para usuarios con un consumo inferior a 5000 kWh/año, es decir, clientes que utilizan el gas natural únicamente para agua caliente sanitaria y cocina. En cambio, la tarifa 3.2 está pensada para clientes que además de ACS y cocina, tengan calefacción de gas natural, y que por tanto tengan un consumo entre 5000 y 50 000 kWh/año.

Tarifa	Consumo (kWh/año)	Usos
3.1	< 5000	ACS, cocina
3.2	5000 – 50 000	ACS, cocina, calefacción

Tabla 6. Tarifas de gas natural

Los supermercados en general tienen una gran superficie que climatizar, por lo que se supone que tendrán un consumo de gas natural elevado. El edificio que se va a estudiar tiene una superficie de 1500 m<sup>2</sup>, por lo que se va a suponer una tarifa de gas 3.2. El precio del gas natural para los cálculos de este trabajo se ha calculado como la media de los precios de diferentes comercializadoras, que se exponen a continuación:

Comercializadora	Precio (€/kWh)
EDP	0,0515
Naturgy	0,0473
Repsol	0,0579
Endesa	0,0468
<b>Media</b>	<b>0,050875</b>

Tabla 7. Precios comercializadoras gas natural

Tal y como se observa en la tabla, los costes de la calefacción de gas natural mostrados en este trabajo se van a calcular con un precio del gas natural de 0,050875 €/kWh.

### 2.3. EMISIONES CO<sub>2</sub>

Dentro de los objetivos del presente estudio se encuentra el análisis medioambiental de las estrategias de recuperación del calor propuestas para un sistema de refrigeración con CO<sub>2</sub> transcrito. Se deben evaluar las emisiones contaminantes que genera tanto el caso base de estudio, como cada una de las alternativas analizadas, y así poder compararlas y determinar qué opción es la menos perjudicial para el medio ambiente. Una opción para saber cuántas

emisiones de CO<sub>2</sub> se expulsan a la atmósfera es utilizar los coeficientes de paso a kilogramos de CO<sub>2</sub> de cada tipo de energía.

Los coeficientes de paso son factores de conversión que sirven para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> o la energía primaria consumida, a partir de la energía final que se consume en una instalación térmica. Por tanto, conociendo la cantidad de electricidad y gas natural que se consume en cada uno de los casos que se van a estudiar, se pueden calcular los kilogramos de CO<sub>2</sub> emitidos. Se van a utilizar los coeficientes de paso de la herramienta HULC (Herramienta Unificada Líder/Calener), un programa utilizado para la verificación del DB-HE del Código Técnico de la Edificación y para la certificación energética de edificios.

Energético	a Energía Primaria Total [kWhEP/kWhEF]	a Energía Primaria No Renovable [kWhEPNR/kWhEF]	a Emisiones de CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> /kWhEF]
Electricidad	2,368	1,954	0,331
Gasoleo calefaccion / Fuel-oil	1,182	1,179	0,311
GLP	1,204	1,201	0,254
Gas Natural	1,195	1,190	0,252
Carbon	1,084	1,082	0,472
Biomasa no densificada	1,037	0,034	0,018
Biomasa densificada (pelets)	1,113	0,085	0,018
RED1	1,000	1,000	1,000
RED2	1,000	1,000	1,000

Imagen 7. Factores de paso de energía final extraído de la herramienta HULC

Tal y como se puede observar en la tabla anterior, para calcular cuántos kilogramos de dióxido de carbono se emiten al utilizar gas natural, se deben multiplicar los kWh de energía que se consiguen a partir del gas natural (calefacción y ACS) por el factor de paso 0,252 kgCO<sub>2</sub>/kWhEF, y de manera similar para calcular las emisiones producidas por la utilización de la electricidad, multiplicando por el factor de paso 0,331 kgCO<sub>2</sub>/kWhEF.

#### 2.4. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA CALORÍFICA

Los últimos datos que faltan por conocer son los de la demanda calorífica del supermercado, es decir, cuánta energía es necesaria en un supermercado hora a hora a lo largo de un año para calefacción y agua caliente sanitaria. Puesto que no se dispone de información ni datos de consumo de un supermercado real, para realizar este estudio se debe contar con un programa informático que permita calcular la demanda calorífica de un supermercado. Las características del mismo deben asimilarse lo máximo posible a las de un supermercado real.

Existen diversos softwares para la simulación de edificios y supermercados, cada uno con diferentes características y propiedades. Por ejemplo, se debe tener en cuenta que con algunas herramientas se puede calcular el consumo energético de todo un supermercado, mientras que con otras se calcularán únicamente algunos subsistemas (refrigeración, ventilación, aire acondicionado, iluminación...). Las personas a las que va dirigida la herramienta (investigadores,



ingenieros...) también es un valor a tener en cuenta, así como la biblioteca de componentes y de propiedades de fluidos que posea, especialmente relevante en cálculos de refrigeración.

Por los motivos mencionados, se ha realizado un pequeño estudio para determinar cuál de ellos resulta óptimo para la aplicación.

### **EnergyPlus**

Se trata de un programa para simular energéticamente edificios, en el que se puede simular tanto el consumo de energía como el de agua. Es un programa muy potente, con él se puede modelar un supermercado entero, con todos sus subsistemas. Sin embargo, se trata de una herramienta difícil de utilizar debido a su complejidad y la falta de una interfaz de usuario intuitiva, por lo que está más aconsejado para investigadores y personas ya hábiles manejando el programa.

### **DesignBuilder**

DesignBuilder es otro programa para realizar simulaciones energéticas de edificios completos. Una ventaja muy importante es que utiliza como motor de cálculo EnergyPlus y tiene una interfaz que permite introducir datos mucho más cómodamente que el programa anterior. Con él se pueden calcular las demandas de calor, frío y agua caliente sanitaria de un edificio a lo largo de todo un año.

### **CyberMart**

Es un programa con el que se puede calcular el consumo energético de todos los sistemas de un supermercado. La interfaz es muy intuitiva de utilizar y permite comparar el consumo de dos diseños de refrigeración para un mismo supermercado. Este programa ha sido desarrollado por un investigador (Arias, 2005) y no se encuentra disponible para la utilización de cualquier persona que lo desee.

### **PackCalculationPro**

PackCalculationPro también es una herramienta para cálculo de subsistemas, en concreto refrigeración y bombas de calor. Contiene numerosas opciones para los ciclos de frío, tipos de condensadores y evaporadores. También es posible adaptar varios parámetros y la interfaz es muy práctica y sencilla de manejar, siempre que se tengan conocimientos sobre ciclos de refrigeración, y aunque posee una base de datos de compresores reales, con más de 7000 modelos, no sirve para calcular sistemas de calefacción.

Habiendo analizado los programas anteriores, se ha decidido utilizar para calcular la demanda calorífica del supermercado el programa *DesignBuilder*. Entre las razones por las cuáles se ha elegido este programa se encuentra la facilidad de utilización, accesibilidad al software y los numerosos manuales y tutoriales a disposición del usuario proporcionados por los propios desarrolladores del programa. Se ha descartado utilizar *CyberMart* ya que no se ha conseguido acceder al software, *EnergyPlus* por la dificultad de utilización del programa, y *PackCalculationPro* por no disponer de cálculos de demanda calorífica.

Una vez seleccionado el programa que se va a utilizar, se debe crear el supermercado y simular un año de funcionamiento, para poder conocer su demanda de calor.

#### **2.4.1. Características físicas del supermercado**

En *DesignBuilder*, el primer paso que se debe hacer es crear el edificio que se va a estudiar. En este apartado se van a explicar las características físicas de ese edificio; dimensiones, composición de cerramientos, aberturas...etc.

El edificio tiene una superficie de 1500 m<sup>2</sup>, con unas dimensiones de 30 x 50 x 5 metros, y tal y como se puede apreciar en las siguientes imágenes, está dividido en cinco zonas.



Imagen 8. Vista exterior del supermercado

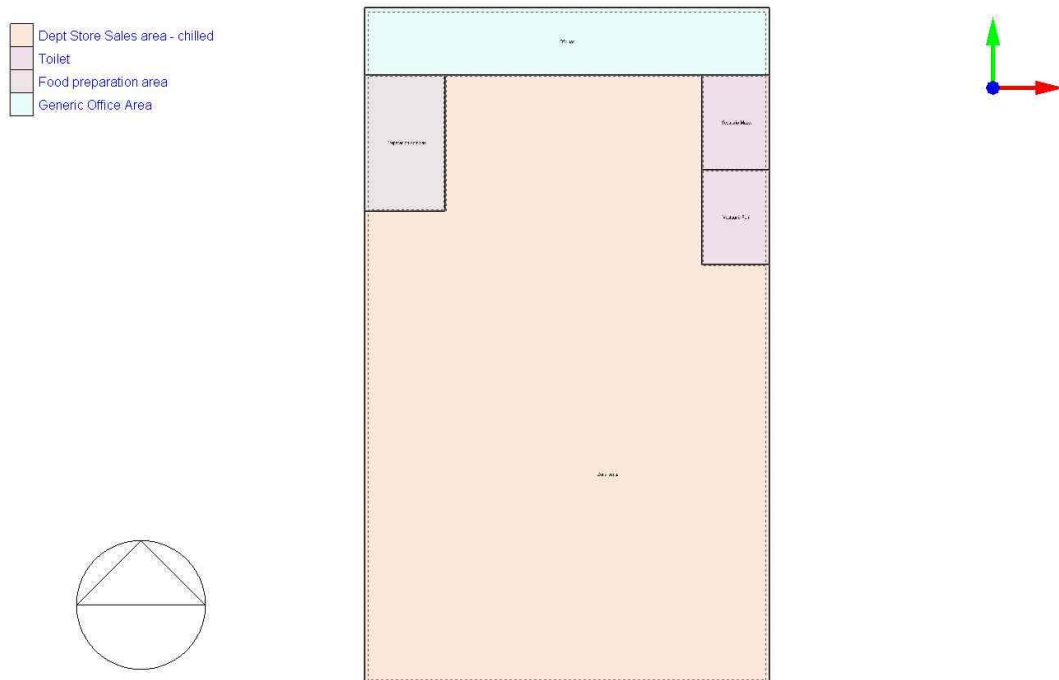


Imagen 9. Distribución interior del supermercado

Las cinco zonas en las que se ha dividido el supermercado son las siguientes:

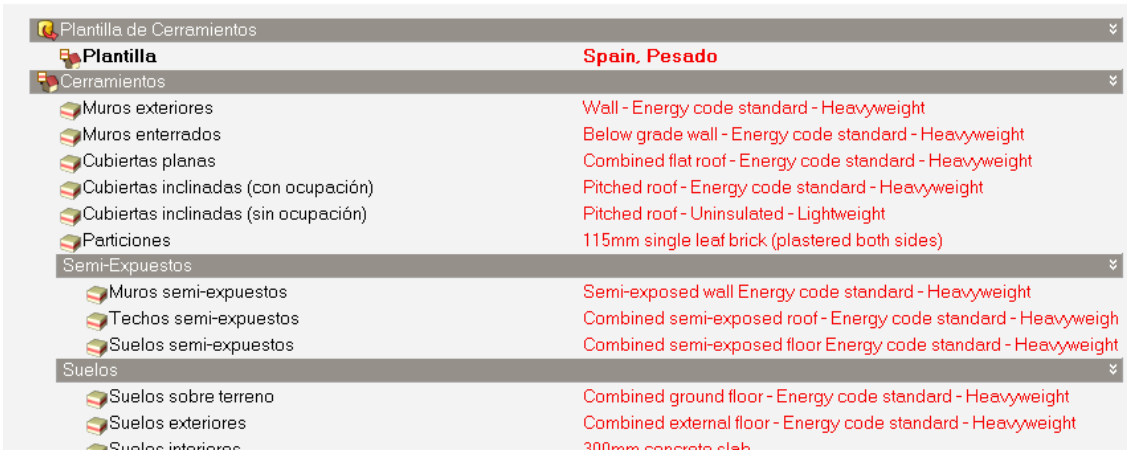
Zona	Superficie
Oficinas	150 m <sup>2</sup>
Preparación de comidas	60 m <sup>2</sup>
Vestuario masculino	35 m <sup>2</sup>
Vestuario femenino	35 m <sup>2</sup>
Compras	1220 m <sup>2</sup>

**Tabla 8. Superficie de cada zona del supermercado**

En el apartado posterior se va a explicar con detalle la actividad de cada una de las zonas, así como los horarios.

Una vez creado el edificio y sus zonas, hay que definir los cerramientos y las aberturas. Los materiales y los grosores que los compongan son determinantes a la hora de calcular las cargas internas tanto de refrigeración como de calefacción, pues cuanto más aislante sea el edificio, menores serán las cargas y menor será el consumo energético.

En *DesignBuilder* se pueden escoger plantillas de cerramientos predeterminadas, dependiendo del tipo de edificio que se esté estudiando y el país en el que esté ubicado. El programa asigna a los cerramientos anteriormente definidos las características de la plantilla seleccionada. Para este caso se ha seleccionado la plantilla de un edificio pesado en España, y a continuación se muestran sus características.



Plantilla de Cerramientos	Spain, Pesado
<b>Plantilla</b>	<b>Spain, Pesado</b>
<b>Cerramientos</b>	
Muros exteriores	Wall - Energy code standard - Heavyweight
Muros enterrados	Below grade wall - Energy code standard - Heavyweight
Cubiertas planas	Combined flat roof - Energy code standard - Heavyweight
Cubiertas inclinadas (con ocupación)	Pitched roof - Energy code standard - Heavyweight
Cubiertas inclinadas (sin ocupación)	Pitched roof - Uninsulated - Lightweight
Particiones	115mm single leaf brick (plastered both sides)
<b>Semi-Expuestos</b>	
Muros semi-expuestos	Semi-exposed wall Energy code standard - Heavyweight
Techos semi-expuestos	Combined semi-exposed roof - Energy code standard - Heavyweigh
Suelos semi-expuestos	Combined semi-exposed floor Energy code standard - Heavyweight
<b>Suelos</b>	
Suelos sobre terreno	Combined ground floor - Energy code standard - Heavyweight
Suelos exteriores	Combined external floor - Energy code standard - Heavyweight
Suelos interiores	300mm concrete slab

**Imagen 10. Plantilla de cerramientos**

En la imagen se pueden observar muchos tipos de cerramientos, sin embargo, como el edificio que se ha creado es relativamente sencillo, no se van a utilizar todos. En la siguiente tabla se exponen las características más relevantes de los muros, techo y suelo que se han utilizado; las diferentes capas que los componen y sus transmitancias térmicas, valor que mide cuánto calor por unidad de superficie es capaz de transmitirse cuando hay una diferencia de un grado Kelvin entre los dos ambientes que separa un cerramiento.

Análisis energético, económico y medioambiental de diferentes sistemas de calefacción con recuperación de calor en supermercados

Cerramiento	Capa 1 (externa)	Capa 2	Capa 3	Capa 4 (interna)	U (W/ m2 K)
<b>Muros exteriores</b>	10 cm mampostería	8 cm poliestireno extruido	10 cm hormigón	1,3 cm enlucido de yeso	0,351
<b>Particiones (paredes interiores)</b>	1,3 cm enlucido de yeso	11,5 cm interior de mampostería	1,3 cm enlucido de yeso	-	1,959
<b>Suelo</b>	10 cm espuma de urea formaldehído	10 cm hormigón fundido	7 cm pavimento	3 cm recubrimiento	0,314
<b>Cubierta</b>	1 cm asfalto	10 cm lana de vidrio	20 cm espacio de aire	1,3 cm yeso	0,346

**Tabla 9. Características cerramientos supermercado**

A continuación se puede ver la sección de cada uno de los cerramientos:

Muros exteriores



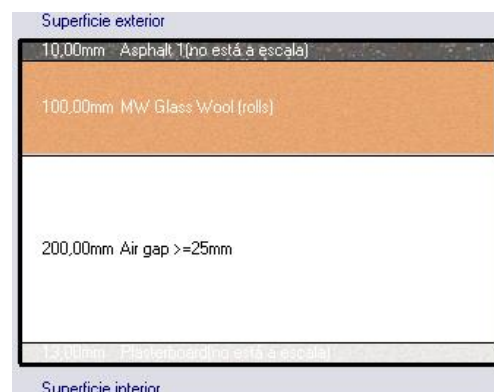
Particiones



Suelo



Cubierta



**Tabla 10. Secciones de los cerramientos**

Una vez se tienen escogidos los cerramientos, se procede a seleccionar las aberturas de forma muy similar. Se han considerado puerta y ventanas de doble cristal con marcos de aluminio con rotura de puente térmico.

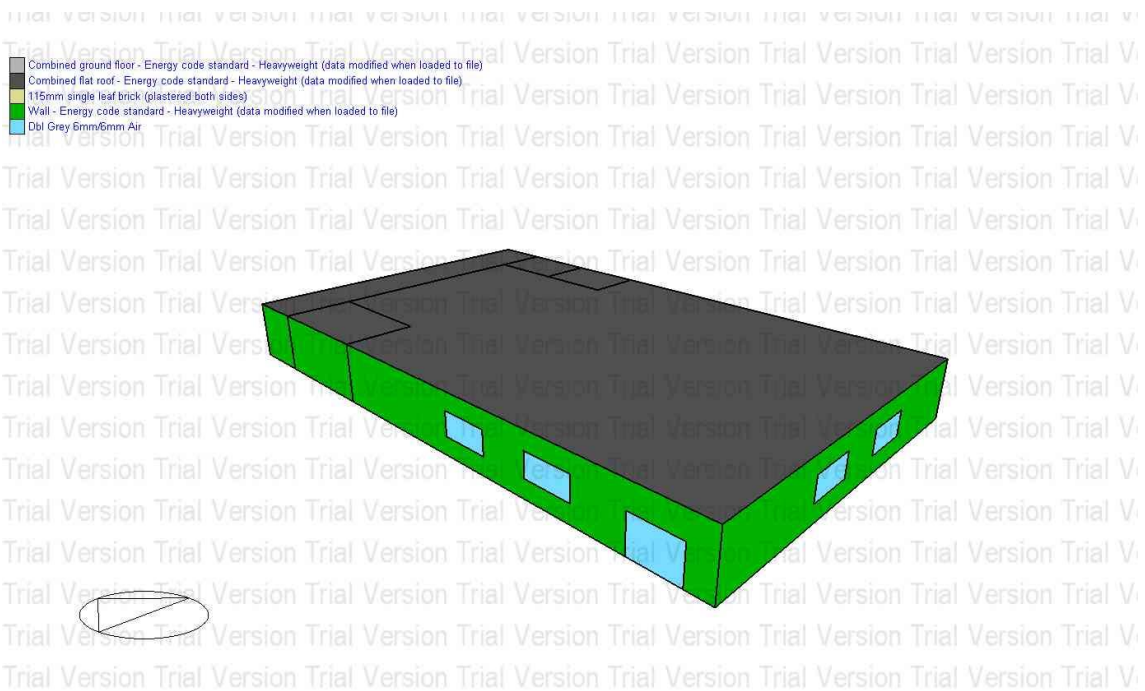
Abertura	Dimensiones	Capa 1	Capa 2	Capa 3	U (W/ m2 K)
<b>Ventanas</b>	2x4 m <sup>2</sup> 32 m <sup>2</sup> totales	6 mm vidrio	6 mm aire	6 mm vidrio	3,094
<b>Marcos</b>	-	2 mm aluminio	5 mm cloruro de plovinilo (PVC)	-	5,01
<b>Puerta</b>	3x4 = 12 m <sup>2</sup>	6 mm vidrio	6 mm aire	6 mm vidrio	3,094

**Tabla 11. Características aberturas supermercado**



**Imagen 11. Sección marcos ventanas**

Tras seleccionar las aberturas del supermercado, ya se tienen determinadas todas sus características físicas, y el siguiente paso es definir la actividad que se realiza en cada una de las zonas del supermercado, así como horarios de apertura y cierre.



**Imagen 12. Vista del supermercado con los diferentes cerramientos y aberturas**

#### **2.4.2. Actividad del supermercado**

En el apartado anterior se ha construido el edificio que se quiere simular para obtener su demanda calorífica, pero las características físicas no son suficientes, hay que definir qué actividad se lleva a cabo en cada una de las zonas que se han definido en el supermercado. En este apartado se van a escoger los horarios del supermercado, los equipos que hay en cada zona, las condiciones metabólicas, las consignas de calefacción y temperatura...etc.

Para escoger las características de cada zona, existen plantillas de actividad, tal y como se ha visto anteriormente para los cerramientos y aberturas. Se escoge una plantilla que se adecúe a la actividad que va a tener una determinada zona y se modifican si es necesario algunos de los valores. A continuación se muestra un ejemplo de estas plantillas de actividad:

**Plantilla de Actividad**

**Plantilla** Dept Store Sales area - general

Sector A1/A2 Retail and Financial/Professional services

Multiplicador de zona 1

Incluir zona en cálculos térmicos

Incluir zona en cálculos de luz diurna con Radiance

Áreas de Suelo y Volúmenes

Ocupación

¿Ocupado?

Densidad de ocupación (personas/m<sup>2</sup>) 0,1169

Programación Ret\_DeptStore\_Sales\_Occ

Inicio 9:00

Final 21:00

Días por semana 6,0

Condiciones Metabólicas

Tasa metabólica Standing/walking

Factor (Hombre=1,00, Mujer=0,85, Niño=0,75) 0,90

Tasa de generación de CO2 (m<sup>3</sup>/s-W) 0,0000000382

Vestimenta

Ponderación de Temperatura Radiante para Confort

Velocidad del aire

Generación y Eliminación de Contaminantes

Días Festivos

ACS

Control Ambiental

Consignas de Temperatura para Calefacción

Calefacción (°C) 20,0

Consigna secundaria (°C) 15,0

Consignas de Temperatura para Refrigeración

Refrigeración (°C) 25,0

Consigna secundaria (°C) 28,0

Imagen 13. Plantilla de actividad edificio

Como se muestra en la imagen anterior, se ha seleccionado un horario de 9:00 a 21:00 horas, 6 días a la semana, pues se ha considerado que es un horario bastante realista para un supermercado.

La tasa metabólica es el gasto energético por unidad de tiempo de las personas que se encuentren dentro del edificio. En este caso se ha considerado que la actividad que se va a realizar es la de una persona parada o caminando, por lo que el gasto energético será bajo. Esto es importante porque dependiendo de la actividad que se realice en una zona se desprenderá más calor al ambiente o menos, e influirá directamente sobre las necesidades de calefacción y refrigeración. El factor metabólico se ha considerado mixto por haber hombres y mujeres.

Las temperaturas de consigna son las temperaturas ambiente que se quieren conseguir en verano y en invierno con los sistemas de refrigeración y calefacción. En invierno la calefacción se pondrá en funcionamiento cuando la temperatura en el interior del edificio sea inferior a 20°C, y en verano el aire acondicionado funcionará cuando la temperatura interior supere los 25°C.

Para cada una de las zonas del supermercado se ha definido una actividad, un horario y una tasa metabólica en función de las tareas que se vayan a realizar en cada una.

Zona	Actividad	Horario	Tasa metabólica
Oficinas	Oficinas, salas de reuniones, pasillos, zonas para fotocopiadoras y espacio para comer	9:00 – 18:00	Trabajo ligero de oficina / Caminar (mixto)
Preparación de comidas	Área donde se preparan comidas	9:00 – 17:00	Trabajo manual ligero (mixto)
Vestuario masculino	Baños y taquillas	9:00 – 21:00	Parado / Caminando (hombre)
Vestuario femenino	Baños y taquillas	9:00 – 21:00	Parado / Caminando (mujer)
Compras	Área de compras con cantidad considerable de neveras y congeladores	9:00 – 21:00	Parado / Caminando (mixto)

Tabla 12. Actividad según la zona del supermercado

Al realizar la simulación *DesignBuilder* tiene en cuenta la actividad que se ha definido para cada zona, por ejemplo en la zona de compras tiene en cuenta que hay equipos que consumen grandes cantidades de energía como las neveras y congeladores, y en el área de preparación de comidas se tiene en cuenta que las personas que trabajan en esa zona realizan movimientos mas activos que en otras zonas. Todas estas cuestiones repercuten en la cantidad de calor que se expulsa al ambiente y por tanto en la demanda de calor y frío del edificio.

### 2.4.3. Sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación natural

Puesto que el objetivo de la simulación es averiguar qué cantidad de energía calorífica demanda el supermercado para poder analizar estrategias de recuperación de calor en el sistema de refrigeración, se deben definir de manera adecuada los sistemas de calefacción y refrigeración.

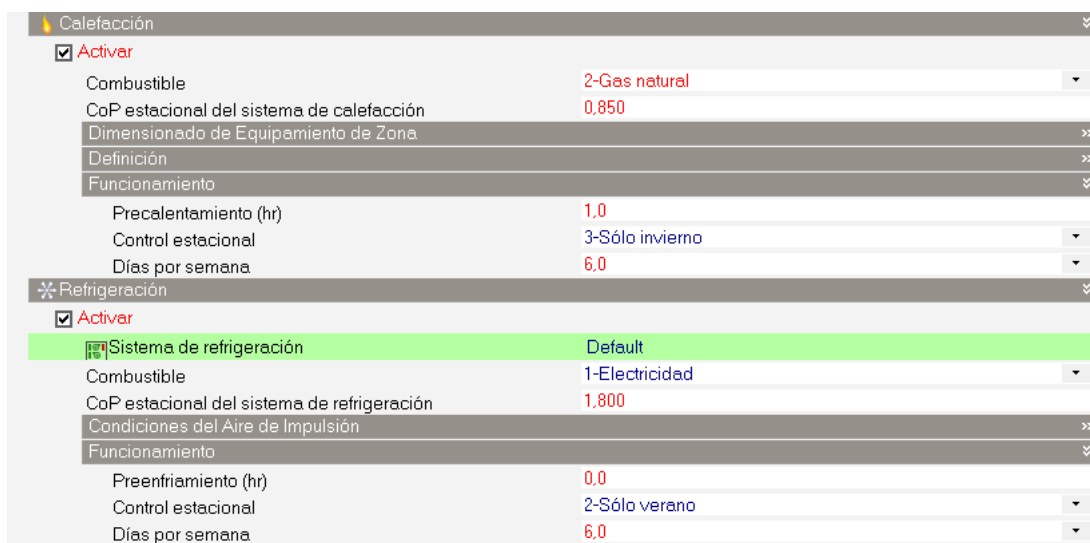


Tabla 13. Sistemas de calefacción y refrigeración del supermercado



Se ha escogido el gas natural como fuente de energía para el sistema de calefacción, una caldera de gas natural con un COP de 0,85. También se ha determinado que el edificio se precaliente 1 hora antes de la apertura, siempre que la temperatura ambiente así lo requiera. Es necesario suponer un sistema de calefacción con gas natural, pues en el caso base que se va a estudiar más adelante, la demanda de calor del supermercado se suple con esta fuente de energía.

Para la refrigeración se ha supuesto un sistema de fancoils con un EER en el sistema de generación de 1'8 y sin precalentamiento.

La ventilación natural es un factor muy importante a tener en cuenta, pues la cantidad de veces que se renueva el aire de una estancia es determinante a la hora de calcular el aporte energético que necesita dicha estancia hora a hora, ya sea de frío o calor. En este caso se ha supuesto una tasa de 1,5 renovaciones de aire cada hora.

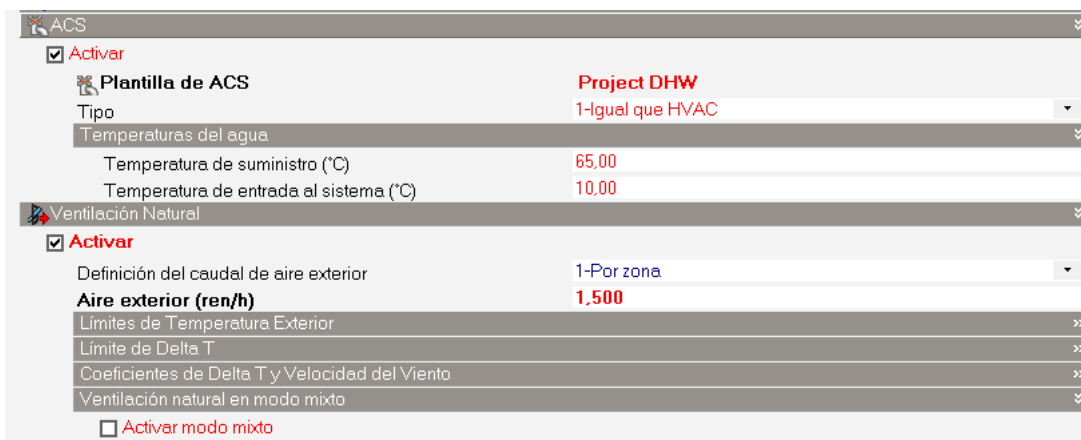


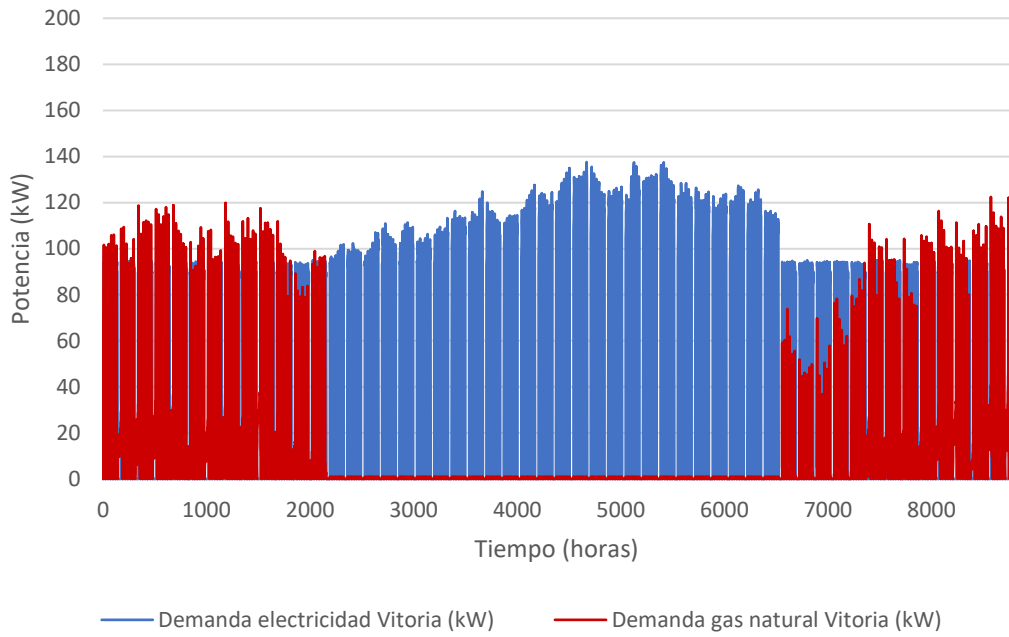
Imagen 14. Ventilación natural y ACS en el supermercado

Para calentar el agua caliente sanitaria se ha supuesto el mismo sistema que para la calefacción, a partir de gas natural, de manera que el consumo de gas natural corresponde a las necesidades caloríficas, tanto ambientales como de ACS.

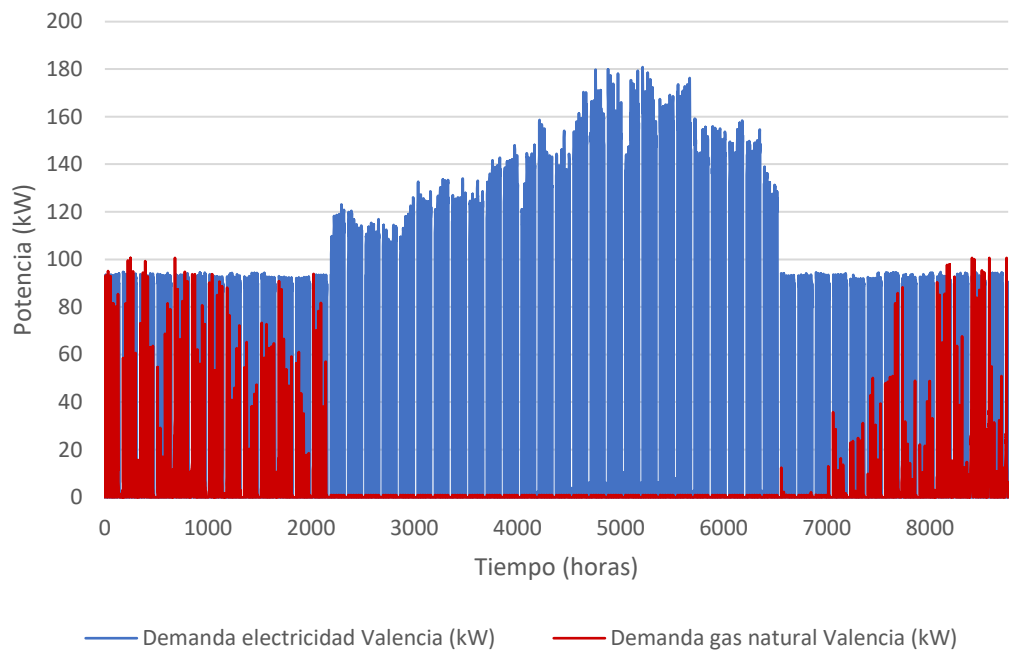
#### 2.4.4. Resultados *DesignBuilder*

El programa *DesignBuilder* permite calcular las demandas energéticas y de agua de cualquier edificio que se construya en el programa. En concreto para este estudio se necesita conocer la demanda calorífica de un supermercado de 1500 m<sup>2</sup> situado en Valencia, Vitoria y Sevilla, con las características que se han expuesto en apartados anteriores.

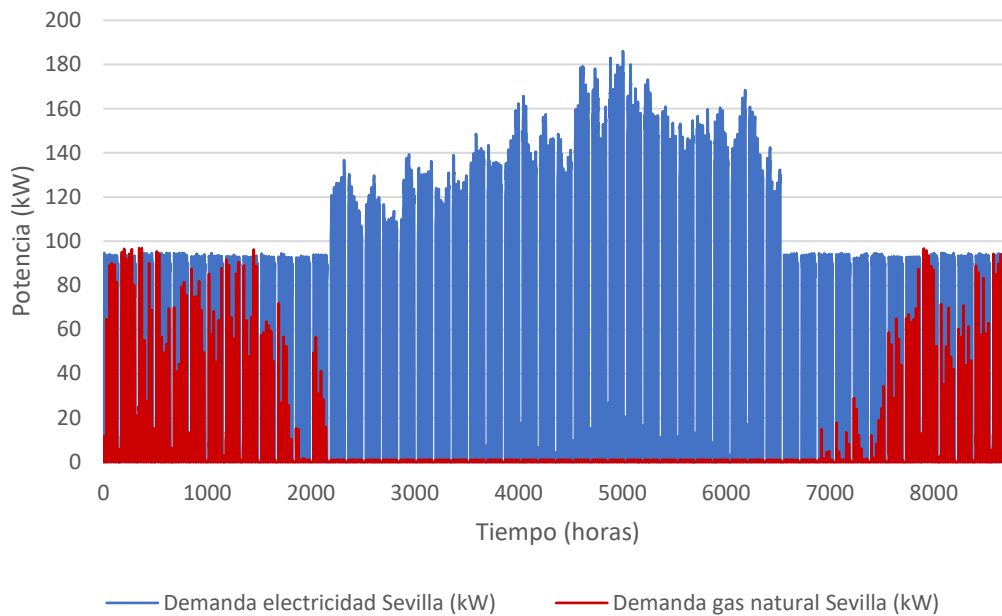
Se muestran los consumos desglosados de cada una de las tres ubicaciones del supermercado, para poder observar las diferencias dependiendo de la ubicación geográfica y por tanto, del clima.



**Gráfica 3. Demanda de electricidad y gas natural en Vitoria**



**Gráfica 4. Demanda de electricidad y gas natural en Valencia**



**Gráfica 5. Demanda de electricidad y gas natural en Sevilla**

En las imágenes anteriores se puede observar claramente la influencia del clima en las necesidades energéticas del edificio. En Vitoria, la ciudad con el clima más frío, el pico de gasto en gas natural sobrepasa los 120 kW, mientras que en Valencia se sitúa en 100 kW y en Sevilla ni siquiera se alcanza este valor. En cambio en el gasto de electricidad se ve lo contrario, en Sevilla, la ciudad más calurosa, el pico más alto está por encima de 180 kW y en Vitoria no se llega a los 140 kW. La demanda de electricidad que se ha representado en las gráficas no corresponde únicamente al sistema de refrigeración, también incluye el gasto de electricidad de los equipos instalados en el supermercado, por ese motivo se aprecia demanda de electricidad durante todo el año. Los picos en los meses centrales del año sí que son debidos a la climatización del ambiente mediante fan coils.

Como ya se ha explicado anteriormente, la temperatura exterior es un factor importante a la hora de analizar el comportamiento de ciclos subcríticos o transcíticos de CO<sub>2</sub>, no sólo por la temperatura a la que debe condensar el refrigerante, también por la cantidad de energía que debe ser capaz de producir el sistema y la cantidad de calor que se puede recuperar.

Una vez se ha obtenido la demanda calorífica del supermercado en cada una de las ciudades de interés, ya se posee toda la información necesaria para comenzar el estudio sobre las diferentes maneras de recuperar calor de un ciclo de refrigeración con CO<sub>2</sub> transcítico. La información que se ha obtenido en este capítulo ha sido: temperatura ambiente y humedad relativa de Valencia Sevilla y Vitoria, precios de la electricidad y el gas natural, emisiones de CO<sub>2</sub> provocadas por la electricidad y el gas natural y demanda calorífica del supermercado.

En el siguiente capítulo se va a explicar con detalle el funcionamiento del ciclo de refrigeración con CO<sub>2</sub> transcítico, las ecuaciones termodinámicas que lo definen y cada uno de los casos de recuperación del calor que se van a estudiar.



## **CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN Y OPCIONES DE RECUPERACIÓN DE CALOR**

En este capítulo se va a presentar el esquema del ciclo de refrigeración con CO<sub>2</sub> transcrito que se ha analizado, se van a definir cada uno de los equipos que lo componen, las ecuaciones utilizadas y por último, los casos que se van a estudiar de recuperación de calor.

Este tipo de sistemas que proporcionan tanto la carga de refrigeración como la de calefacción se denominan RIHC (refrigeration integrated heating and cooling systems) y en este caso, para la recuperación de calor, se va a contar con bombas de calor, calentadores eléctricos y tanques de almacenamiento térmico.

Para realizar este análisis se ha utilizado la herramienta web definida por Sarabia, EJ (Sarabia, 2020) que permite, introduciendo toda la información que se ha conseguido en el capítulo anterior en formato CSV, obtener mucha información sobre el funcionamiento del ciclo, la energía que se recupera del ciclo de refrigeración, el consumo que tienen los sistemas de calefacción auxiliares, el consumo del sistema de refrigeración, las emisiones de cada equipo..., etc. Este método de cálculo ha sido validado y explicado en artículos como (Sarabia *et al.*, 2019 y Maouris *et al.*, 2020).

### **3.1. ESQUEMA CICLO REFRIGERACIÓN CON CO<sub>2</sub> Y RECUPERACIÓN DE CALOR**

A continuación se muestran los esquemas que se van a utilizar a lo largo de este trabajo y seguidamente unas tablas en las que se definen los puntos del ciclo. El ciclo de refrigeración es el que se encuentra en la parte izquierda de los esquemas, cuyos puntos están señalizados con números, mientras que el resto de elementos son los utilizados para la recuperación de calor.

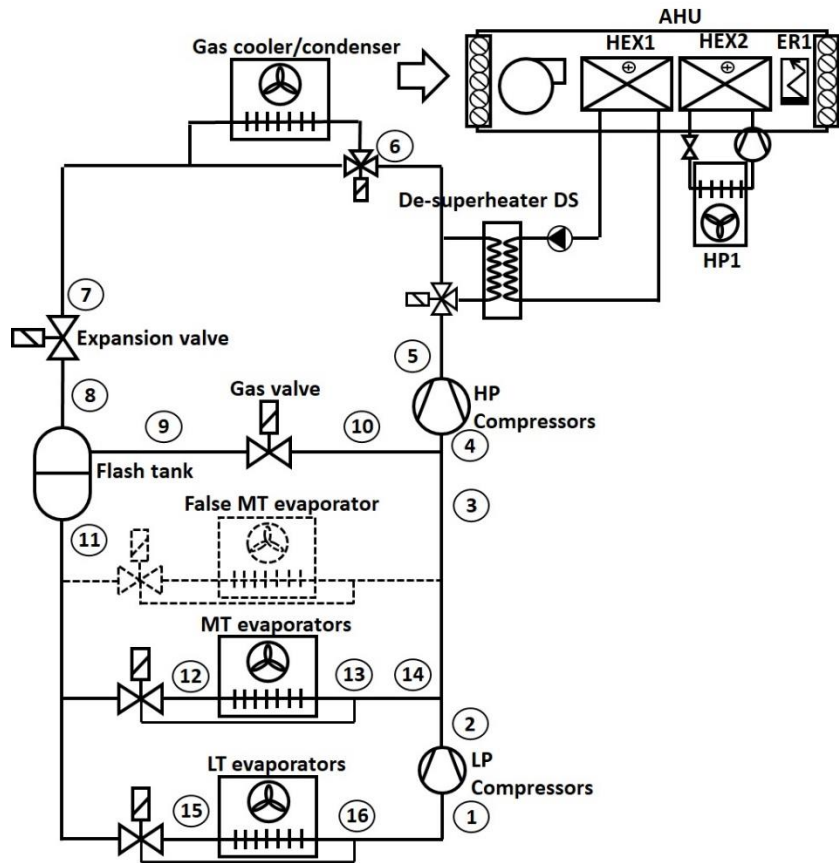


Imagen 15. Sistema de refrigeración con UTA para calefacción

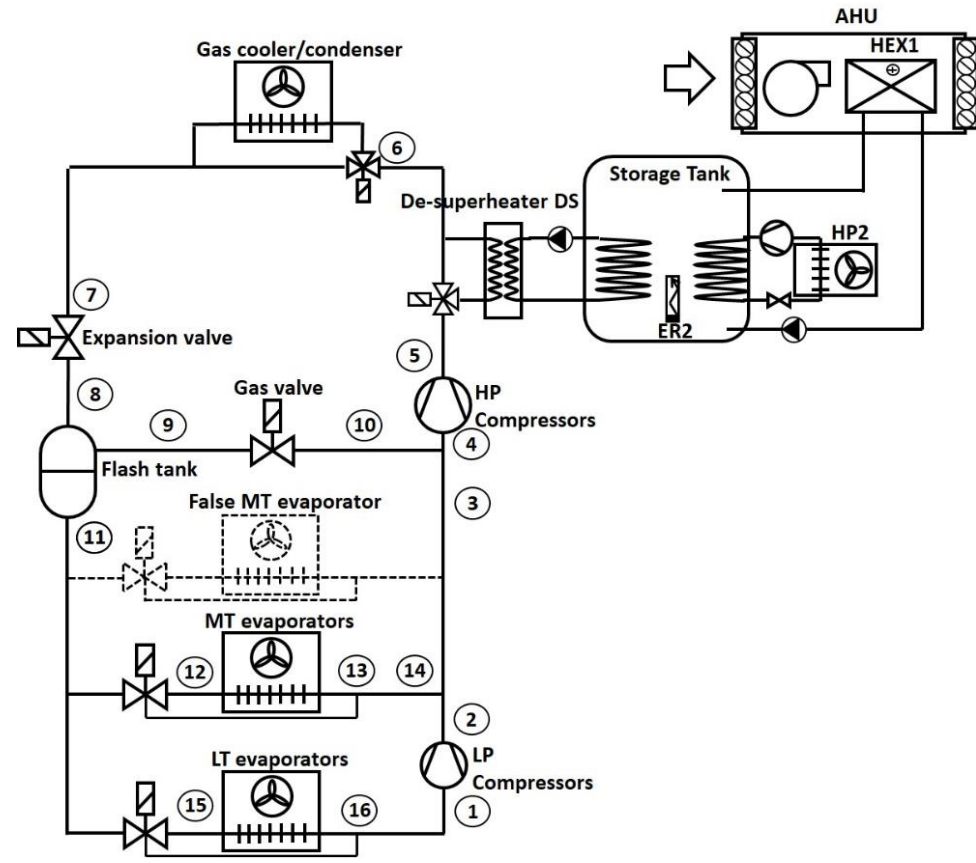


Imagen 16. Sistema de refrigeración con tanque de almacenamiento térmico

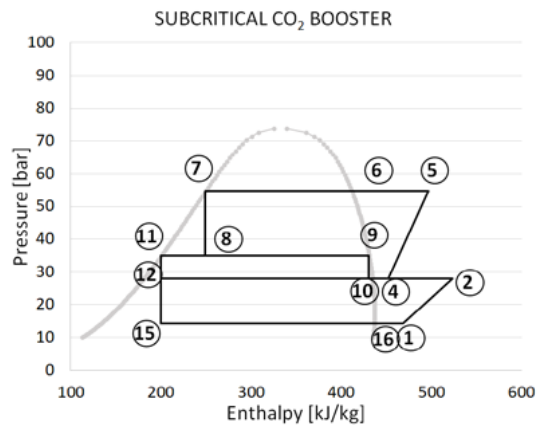


Imagen 17. Diagrama p - h ciclo subcrítico

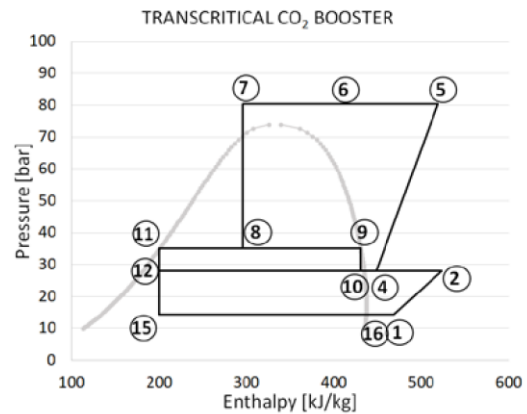


Imagen 18. Diagrama p - h ciclo transcrito

Punto	Estado
1	Vapor sobrecalentado baja presión
2	Vapor sobrecalentado media presión
3	Vapor sobrecalentado media presión
4	Vapor sobrecalentado media presión
5	Vapor sobrecalentado alta presión
6	Vapor sobrecalentado alta presión
7	Vapor sobrecalentado alta presión/ Vapor saturado
8	Mezcla líquido - vapor
9	Vapor saturado
10	Mezcla líquido - vapor
11	Vapor saturado
12	Mezcla líquido - vapor
13	Vapor sobrecalentado media presión
14	Vapor sobrecalentado media presión
15	Mezcla líquido - vapor
16	Vapor sobrecalentado baja presión

Tabla 14. Puntos del ciclo de refrigeración

El ciclo de refrigeración representado es muy similar al que se puede encontrar en los supermercados. Se trata de un sistema booster de doble compresión, en el esquema se pueden observar los compresores de baja y alta presión. Tal y como se ha explicado al inicio del trabajo, en los supermercados se dividen las cargas del sistema de refrigeración en dos; las neveras corresponden a los evaporadores de media temperatura y los congeladores a los evaporadores de baja temperatura.

El sistema posee cuatro niveles de presión, tal y como se muestra en los diagramas p - h: los evaporadores de baja temperatura, los de media temperatura, el tanque flash y el condensador o enfriador de gas. Dependiendo de la temperatura ambiente a la que se pueda condensar el gas en la zona de presión más elevada, se tendrá un ciclo funcionando de forma subcrítica o transcítica.

Evaporadores LT	Evaporadores MT	Tanque flash	Condensador / Enfriador de gas
14 bar	28 bar	35 bar	Max 100 bar

**Tabla 15. Niveles de presión y en el ciclo de refrigeración**

La descripción del ciclo de refrigeración comienza en el punto 1, donde los compresores de baja presión aspiran el vapor sobrecalentado que viene de los evaporadores de baja temperatura, es decir, absorben el calor de los congeladores situados en el supermercado. El vapor sobrecalentado a media presión que se obtiene en el punto 2 se junta con el vapor también sobrecalentado que expulsan los evaporadores de media temperatura (procedentes de las neveras) y con el vapor procedente del tanque flash, obteniéndose el punto 4, vapor sobrecalentado a media presión. El punto 4 es el punto de aspiración de los compresores de alta presión, donde se consigue vapor sobrecalentado a una presión más elevada. Es en este punto del ciclo donde entra en juego la recuperación de calor, pues el vapor se encuentra a muy alta presión y temperatura. Para poder recuperar este calor se deben instalar algunos equipos adicionales a los del sistema de refrigeración, que se explican más adelante. Una vez enfriado el refrigerante en el enfriador de gas o aprovechado el calor para calefacción, el gas se encuentra saturado o sobrecalentado, dependiendo de si el ciclo se encuentra funcionando de manera subcrítica o transcítica (punto 7). Si la temperatura ambiente es superior a 25°C el sistema funciona en modo transcítico, es decir, a una presión por encima de 73,6 bar. En ese momento el gas se introduce en una válvula de expansión, que establece la presión de condensación, y se introduce en el tanque flash. El tanque flash es un dispositivo que separa la mezcla líquido – vapor que se ha obtenido de la válvula de expansión, llevando el refrigerante en estado líquido de vuelta a los evaporadores, donde absorbe el calor de las neveras y congeladores y el ciclo vuelve a comenzar. Es importante que los evaporadores cuenten con válvulas de expansión a su entrada, pues estas tienen la función controlar el sobrecalentamiento del refrigerante a la salida de los mismos, para que no haya líquido en los compresores.

Los elementos que aparecen representados en el esquema y que no han sido explicados en el párrafo anterior son los dispositivos que se utilizan para la recuperación del calor que se extrae del condensador. En primer lugar, a la salida del compresor de alta presión, entre los puntos 5 y 6 se observa un intercambiador de calor que conecta la parte de alta presión y temperatura del



ciclo de refrigeración, con el sistema de calefacción del supermercado (AHU: Air Handling Unit). Este intercambiador de calor se coloca antes del condensador para aprovechar parte del calor antes de su expulsión al exterior. Se pueden ver representados diferentes sistemas de calefacción, la utilización de uno u otro dependerá del caso de recuperación de calor que se esté analizando y que se explicará en el punto 3.4.

En segundo lugar, hay representado con línea discontinua un falso evaporador de media temperatura que funciona en las mismas condiciones que el resto de evaporadores de media temperatura. El objetivo de este dispositivo es aumentar las cargas, el consumo, de los evaporadores de media temperatura, de esa forma se aumenta el flujo de refrigerante que circula por la parte de alta presión, consiguiendo así más calor en el intercambiador y por tanto más calor para el sistema de calefacción. Esta forma de actuar es útil cuando se tiene poca demanda de refrigeración y mucha demanda de calefacción. Aumentar el flujo másico de refrigerante que circula por los evaporadores de media temperatura hace que el recalentamiento a la salida de los compresores de alta temperatura también se incremente, y por lo tanto también la presión. La presión del condensador puede llegar hasta los 100 bar por motivos de seguridad en las instalaciones. Se debe tener en cuenta que, aunque esta metodología es beneficiosa para la recuperación de calor y su aprovechamiento en calefacción, influye negativamente en la eficiencia del sistema de refrigeración, el COP, ya que el frío generado en el evaporador auxiliar no es aprovechado en la instalación.

### 3.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

En el presente apartado se van a mostrar las expresiones utilizadas para describir cada elemento de ciclo termodinámico, pero antes se debe explicar el significado de los subíndices que se van a utilizar.

Subíndice	Significado
HP	Alta presión
LP	Baja presión
HP <sub>comp</sub>	Compresor de alta presión
LP <sub>comp</sub>	Compresor de baja presión
MT	Media temperatura
LT	Baja temperatura
MT <sub>evap</sub>	Evaporador de media temperatura
LT <sub>evap</sub>	Evaporador de baja temperatura

Tabla 16. Significado de los subíndices utilizados en las ecuaciones

Se comienza por el balance de masa:

$$\dot{m}_{HP\ comp} = \dot{m}_{LP\ comp} + \dot{m}_{MT\ evap} + \dot{m}_9$$

Del cuál se puede calcular la masa que circula por el taque flash haciendo un sencillo balance de energía:

$$\dot{m}_9 * (h_9 - h_{11}) = \dot{m}_{HP\ comp} * (h_8 - h_{11}) \rightarrow \dot{m}_9 = \dot{m}_{HP\ comp} * \frac{(h_8 - h_{11})}{(h_9 - h_{11})}$$

El trabajo que se debe aportar a los compresores se calcula de la siguiente manera, siendo  $\eta_{me}$  el rendimiento mecánico de los compresores:

$$\dot{W}_{LP} = \frac{\dot{m}_{LP\ comp} * (h_2 - h_1)}{\eta_{me}}$$

$$\dot{W}_{HP} = \frac{\dot{m}_{HP\ comp} * (h_5 - h_4)}{\eta_{me}}$$

La capacidad de los evaporadores se calcula también con un balance de energía:

$$Q_{LT\ evap} = \dot{m}_{LP\ comp} * (h_{16} - h_{15})$$

$$Q_{MT\ evap} = \dot{m}_{MT\ evap} * (h_{13} - h_{12})$$

Así como la tasa de recuperación de calor, que depende del flujo másico que circula por el intercambiador, tal y como se ha explicado anteriormente. Este flujo másico aumenta cuando se eleva la carga de los evaporadores y también cuando la temperatura del condensador aumenta.

$$Q_{HR} = \dot{m}_{HP\ comp} * (h_5 - h_6)$$

$$\dot{m}_{HP\ comp} = \left( \frac{h_9 - h_{11}}{h_9 - h_8} \right) * \left( \frac{Q_{LT\ evap}}{h_{16} - h_{15}} + \frac{Q_{MT\ evap}}{h_{13} - h_{12}} \right)$$

### 3.3. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

La herramienta web que se va utilizar calcula las propiedades termodinámicas de cada punto del ciclo mediante *CoolProp*, una librería de C++ de propiedades termodinámicas. La herramienta web representa un modelo en estado estacionario, parametrizado para diferentes variables que el usuario debe introducir en formato CSV, con un valor para cada hora del año. Dichas variables son las que se han obtenido en el capítulo 2 de este trabajo, y son: temperatura ambiente exterior, humedad relativa, coste de la electricidad, coste del gas, emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por la electricidad, emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por el gas y demanda calorífica del supermercado.

Los resultados de las simulaciones anuales para los diferentes casos de estudio también se proporcionan en formato CSV, con valores horarios. Sin embargo, antes de realizar las simulaciones se deben definir algunos supuestos y datos externos al sistema.

En los evaporadores, tanto en los de media como en los de baja temperatura, la variación de presión a lo largo del año es baja, por lo que se va a considerar que la presión es constante, y por tanto, su temperatura también lo es.

Evaporador	Media temperatura (MT)	Baja temperatura (LP)
Presión	28 bar	14 bar
Temperatura	-8°C	-30°C

**Tabla 17. Presión y temperatura de los evaporadores del sistema de refrigeración**

Además de la presión y la temperatura a la que operan los evaporadores, se debe tener en cuenta la diferencia de temperatura entre la salida del refrigerante del evaporador y su entrada al compresor. Esta diferencia de temperaturas se denomina sobrecalentamiento, y se van a considerar 15°C de sobrecalentamiento a la salida de ambos evaporadores, debido a la distancia existente hasta los compresores y la diferencia de temperatura entre el refrigerante y el ambiente. (Sarabia *et al.*, 2019)

Para impulsar y aumentar la presión del refrigerante se ha considerado la utilización de tres compresores de baja presión y otros tres de alta, uno de ellos con variador de frecuencia, para ajustar la capacidad de manera más precisa. Todos ellos se suponen de la marca Bitzer.

La presión del tanque flash se establece en 35 bar, ya que es una presión adecuada para el tamaño y características del tanque que se va a utilizar.

Como ya se ha mencionado en la descripción del sistema, la presión máxima que puede alcanzar el enfriador de gas o condensador es de 100 bar. Se va a suponer que la diferencia de temperatura entre la salida del enfriador de gas y la temperatura exterior es de 7°C, de forma que sabiendo la temperatura ambiente, se puede conocer la temperatura a la entrada de la válvula de expansión.

Se ha considerado que las bombas de calor utilizadas tienen un COP de 2 y la caldera de gas natural del caso base una eficiencia de 0,93.

Conocidos los anteriores datos del modelo, se procede a la explicación del sistema de calefacción del supermercado y los diferentes equipos que lo integran.

### **3.4. SISTEMAS DE CALEFACCIÓN ANALIZADOS**

El sistema que proporciona calefacción en los supermercados es mayoritariamente una caldera de gas natural y una unidad de tratamiento de aire (UTA) conectadas mediante un circuito de agua, por ese motivo, es el sistema que se ha escogido como caso base para poder analizar y comparar los resultados del resto de casos de estudio. Es la razón por la cuál también se ha implementado este sistema de calefacción al realizar la simulación del supermercado en *DesignBuilder* para conocer la demanda calorífica del supermercado.

El sistema de calefacción que se va a estudiar es más complejo que el caso base, en el que se utiliza una caldera de gas natural con una eficiencia de 0,93. Los elementos que se pueden apreciar en los esquemas 18 y 19 son: una unidad de tratamiento de aire compuesta por filtros,

ventilador y una unidad de transferencia de calor, un tanque de almacenamiento con capacidad de 2,5 m<sup>3</sup> y los conductos necesarios para el traslado del aire.

La unidad de transferencia de calor tendrá diferentes componentes según el caso que se estudie, y que se explicarán más adelante. En el caso en el que se utilice el tanque de almacenamiento, muchos de los elementos alojados en la UTA se dispondrán en el interior del tanque, tal y como se puede observar en las imágenes 18 y 19 del apartado 3.1.

En la imagen 18 se indica que existe un intercambiador de calor dentro de la unidad de tratamiento de aire (HEX1) que está directamente conectado al des-sobrecalentador. Esto será suficiente para calentar el supermercado cuando el calor recuperable sea igual o mayor que la demanda. En los casos en los que el calor recuperado del ciclo de refrigeración sea insuficiente, se deberá contar con la ayuda de algunos equipos auxiliares, como bombas de calor (HP1 y HP2) y calentadores eléctricos (ER1 y ER2). Las bombas de calor que se han utilizado en este caso son bombas aire – aire (HP1) y bombas aire – agua (HP2), que utilizan el aire ambiente exterior para producir el calor necesario, ya sea intercambiándolo con el aire interior o con el agua del tanque. Las bombas aire – agua que se han utilizado poseen un compresor Frascold Z50-150AXH, cuyo COP puede ir desde 3 hasta 7, dependiendo de la diferencia de temperaturas entre el exterior y el líquido. Los calentadores eléctricos son dispositivos más tradicionales, que generan calor a partir de un radiador.

En la imagen 19 los equipos auxiliares se encuentran integrados en el interior del tanque de almacenamiento, ya que éste es el encargado de mantener el calor recuperado. La temperatura del mismo debe oscilar entre 40 y 70°C, por lo que cuando la temperatura del agua del tanque disminuye por debajo de la temperatura mínima, los equipos auxiliares (HP2 y ER2) se ponen en marcha para mantener la temperatura en los niveles adecuados para el intercambio de calor con la unidad de tratamiento de aire.

Una vez explicados los equipos que contiene el sistema de calefacción y su distribución, se van a definir los diferentes casos de estudio analizados.

Caso	Caldera gas	Falso evaporador	Tanque almacenamiento	ER1	HP1	ER2	HP2
Base	X						
1				X			
2					X		
3		X					
4			X			X	
5			X				X
6		X	X				

Tabla 18. Resumen de los casos que se van a estudiar

#### **3.4.1. Caso base**

Se utiliza únicamente la caldera de gas para satisfacer toda la demanda calorífica del edificio. Como ya se ha explicado anteriormente, éste es el método que tradicionalmente se sigue en los supermercados para calentar el espacio, por eso se va a tomar como referencia.

#### **3.4.2. Caso 1**

Se utiliza para la calefacción el calor recuperado del ciclo de refrigeración y como elemento auxiliar, el calentador eléctrico ER1 situado en el interior de la unidad de tratamiento de aire.

#### **3.4.3. Caso 2**

En este caso se actúa de manera similar al caso anterior pero como elemento auxiliar se usa la bomba de calor aire - aire.

#### **3.4.4. Caso 3**

En el tercer caso de estudio entra en funcionamiento el falso evaporador de media temperatura que se ha explicado en el apartado 3.1, aumentando el gasto másico de refrigerante que circula por la parte de alta presión del ciclo, haciendo aumentar la presión y la temperatura del refrigerante a la salida del compresor de alta. De esta manera, se consigue recuperar más calor del ciclo de refrigeración. Sin embargo, el aumento de potencia frigorífica no es útil, ya que únicamente se aumenta el caudal de refrigerante para conseguir más calor en el des-sobrecalentador.

#### **3.4.5. Caso 4**

A partir del caso 4 se empieza a poner en marcha el tanque de almacenamiento. El calor recuperado se utiliza para calentar el agua del tanque y cuando ésta baja de 40°C, se pone en marcha el calentador eléctrico ER2.

#### **3.4.6. Caso 5**

Similar al caso 4 pero en caso de ser necesario, el sistema auxiliar que calienta el agua del tanque de almacenamiento es la bomba aire – agua HP2.

#### **3.4.7. Caso 6**

El último caso que se va a estudiar incluye el falso evaporador y el tanque de almacenamiento, esta vez sin dispositivos auxiliares, de modo que se utilizará el aumento del caudal másico de refrigerante para producir más calor y mantener el tanque a una temperatura adecuada.

Con este sexto caso se pone fin a las diferentes configuraciones de sistema de calefacción que se van a analizar en este trabajo, y cuyos resultados se muestran en el siguiente capítulo.



## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS**

En el presente y último capítulo de este estudio académico se van a exponer los resultados que se han obtenido con la simulación de los diferentes sistemas de calefacción descritos anteriormente con el aprovechamiento del calor residual del sistema de refrigeración. Los resultados corresponden a la simulación de un año entero y se han utilizado como variables de entrada la temperatura ambiente y humedad relativa de cada ciudad, el precio de la energía que se va a utilizar, las emisiones que éstas producen y la demanda de calefacción del supermercado. Dicha demanda se ha obtenido creando y simulando para cada una de las tres ciudades estudiadas un supermercado de 1500 m<sup>2</sup> en el programa *DesignBuilder*, tal y como se ha explicado en el capítulo 2.

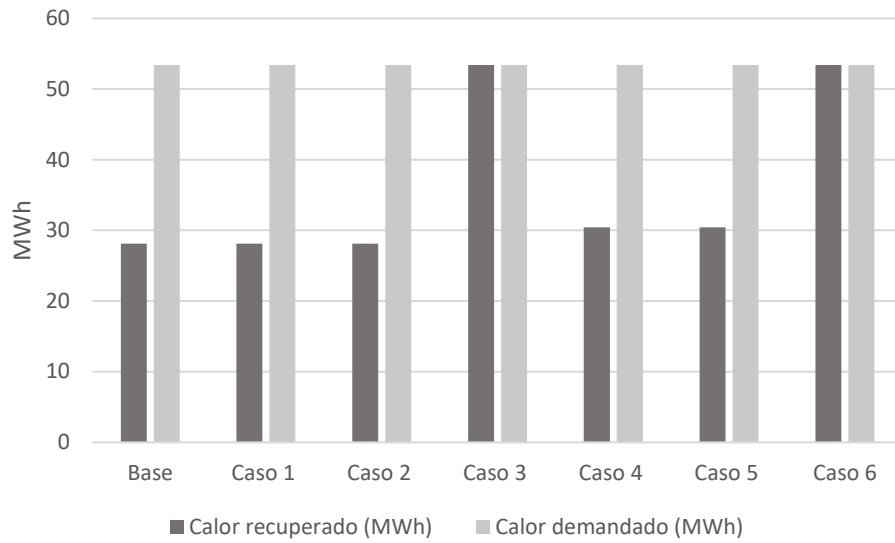
Los resultados y su análisis se van a dividir en tres secciones; resultados energéticos, económicos y medioambientales.

### **4.1. RESULTADOS ENERGÉTICOS**

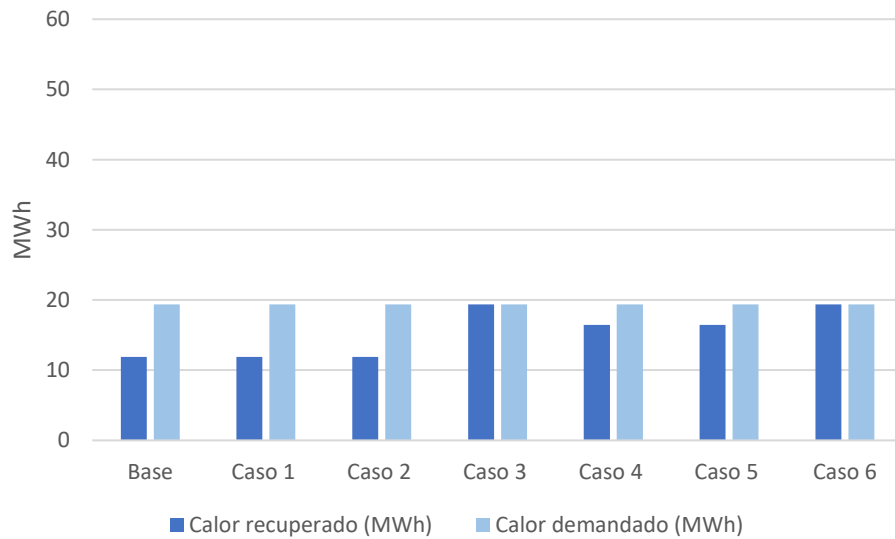
Los resultados energéticos que se pueden obtener a partir de la simulación son; la cantidad de calor recuperado del sistema de refrigeración, el consumo de energía total, el consumo de energía de cada equipo, el COP del sistema y el porcentaje de recuperación de calor. Todo ello para cada uno de los casos que se han descrito en el capítulo anterior.

#### **4.1.1. Calor recuperado**

En primer lugar se va a comparar el calor recuperado del ciclo de refrigeración con el demandado por el sistema de calefacción, para cada una de las ciudades por separado. Los resultados que se muestran en las siguientes gráficas son anuales.

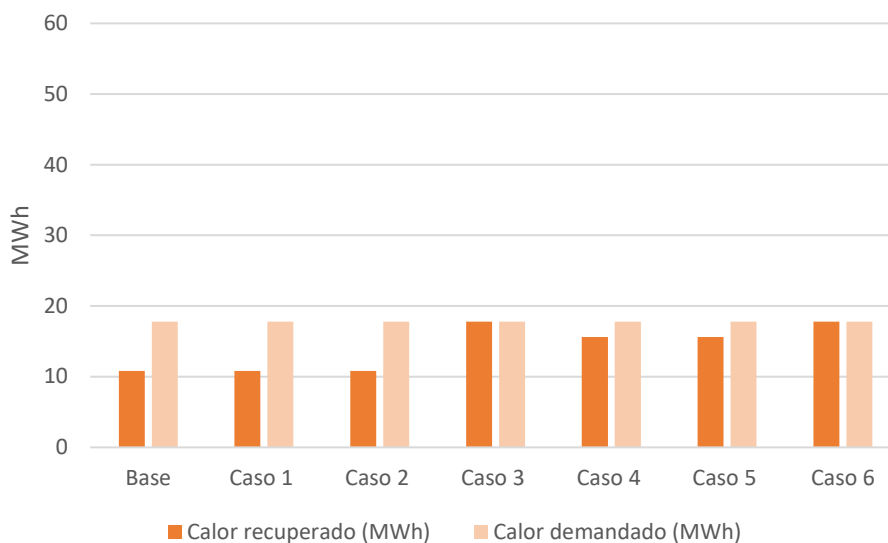


**Gráfica 6. Calor recuperado y calor demandado en Vitoria**



**Gráfica 7. Calor recuperado y calor demandado en Valencia**





**Gráfica 8. Calor recuperado y calor demandado en Sevilla**

La misma información se puede ver en forma de porcentaje, con el porcentaje de energía recuperada respecto a la demandada:

Ciudad	Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
<b>Vitoria</b>	52,62 %	52,62 %	52,62 %	100 %	55,58 %	55,58 %	100 %
<b>Valencia</b>	61,35 %	61,35 %	61,35 %	100 %	79,92 %	79,92 %	100 %
<b>Sevilla</b>	60,78 %	60,78 %	60,78 %	100 %	82,22 %	82,22 %	100 %

**Tabla 19. Porcentaje de energía recuperada respecto a la demandada**

Se puede observar en las gráficas que aunque los resultados de los diferentes casos siguen un patrón similar, hay diferencias claras entre las tres ciudades. Para comenzar, el calor demandado es muy superior en Vitoria, llegando a los 53,4 MWh anuales, y el porcentaje de calor recuperado es menor que en Valencia o Sevilla. Esto es así porque el clima en Vitoria es más frío, por lo que se requiere más calefacción, y al tener menor temperatura exterior, también se requiere menos energía en el sistema de refrigeración, por tanto la salida del compresor de alta presión no tiene suficiente temperatura para llegar a porcentajes tan altos de energía recuperada como en las otras dos ciudades.

En Valencia y Sevilla el calor demandado es bastante menor, entre 17,8 y 19,4 MWh anuales, y la temperatura exterior es superior a la de Vitoria, provocando una menor necesidad de calefacción y mayor de refrigeración, que se refleja en porcentajes más elevados de energía recuperada. Una mayor demanda del sistema de refrigeración se traduce en mayor caudal másico de refrigerante circulando por el sistema, y por tanto, más capacidad para recuperar calor en el des-sobrecalentador y utilizarlo en el sistema de calefacción.

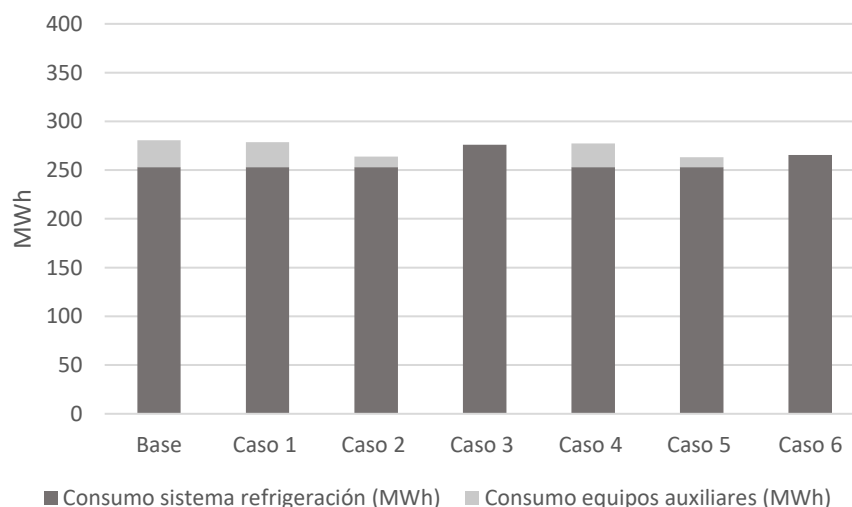
También se observa que en los casos 1 y 2 se recupera el mismo calor del sistema de refrigeración que en el caso base. El motivo es que en estos casos se utiliza el calor sobrante a la salida de los compresores de alta para suplir parte de la demanda de calefacción, y cuando es necesario, se utiliza un calentador eléctrico en el caso 1 o una bomba de calor aire – aire en el caso 2, pero no se cambia el punto de funcionamiento del ciclo de refrigeración respecto al caso base. Lo que se consigue en estos casos es eliminar el consumo del gas natural. Es decir, estas dos opciones son beneficiosas para el medio ambiente porque no se utiliza un combustible fósil como es el gas natural, pero a su vez son las que menos calor recuperan.

En los casos 3 y 6 se suple toda la energía demandada por el sistema de calefacción con el calor sobrante del ciclo de refrigeración, ya que estos dos casos son en los que se utilizan los falsos evaporadores de media temperatura para ajustar el punto de salida de los compresores de alta presión para dar el calor necesario en el sistema de calefacción. Con los falsos evaporadores se trasiega tanto caudal de refrigerante como sea necesario para satisfacer las necesidades de calefacción, lo que afecta de manera negativa a la eficiencia del ciclo de refrigeración, pues se aumenta la potencia frigorífica sin que aumente su demanda.

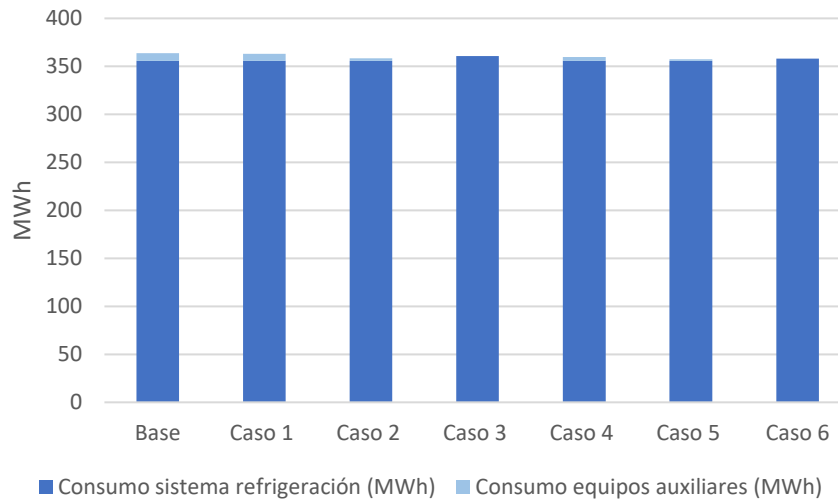
En los casos 4 y 5 se recupera más energía que en los primeros casos, aunque no se llega a satisfacer toda la demanda. Esto es a causa de la utilización del tanque de almacenamiento sin modificar el punto de funcionamiento del ciclo de refrigeración. Se puede almacenar el calor sobrante durante más tiempo gracias a la ayuda del calentador eléctrico (caso 4) y la bomba de calor aire – agua (caso 5), pero no se llega a suplir la demanda sin cambiar la presión y temperatura de salida de los compresores de alta presión. Se recupera más calor que en los casos 1 y 2 en los que no se disponía de un tanque de almacenamiento, y aunque no se llegue a recuperar tanto como para satisfacer completamente la demanda, el consumo de energía del sistema de refrigeración no será tan elevado como en los casos 3 y 6.

#### 4.1.2. Consumo sistema de refrigeración y equipos auxiliares

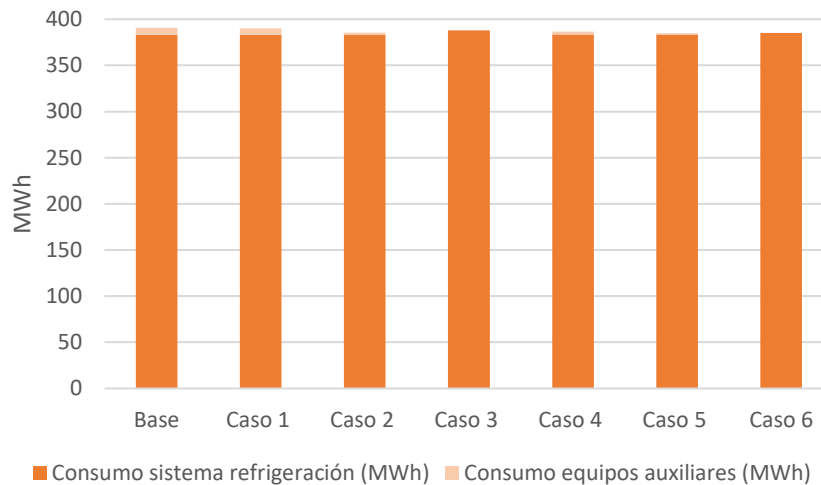
A continuación se va a exponer el consumo de energía del sistema de refrigeración junto con el consumo de los equipos auxiliares de calefacción; calentadores eléctricos y bombas de calor, en los casos en los que se utilicen.



Gráfica 9. Consumo sistema de refrigeración y equipos auxiliares Vitoria



**Gráfica 10. Consumo sistema de refrigeración y equipos auxiliares Valencia**



**Gráfica 11. Consumo sistema de refrigeración y equipos auxiliares Sevilla**

Al contrario de lo que sucedía en el apartado anterior, donde la mayor demanda de calor se daba en Vitoria por tener un clima más frío, en estas gráficas se aprecia claramente que en Valencia y Sevilla el consumo del sistema de refrigeración es bastante más elevado que en Vitoria

Una de las primeras cosas que se percibe en las gráficas anteriores es que en los casos 3 y 6 no hay consumo de equipos auxiliares, pues son los casos en los que se utilizan los falsos evaporadores de media temperatura para aumentar el flujo másico de refrigerante y así obtener mayor presión y temperatura en la parte de alta presión del ciclo. La diferencia entre ambos casos es la utilización del tanque de almacenamiento en el caso 6, que como se puede ver, ayuda a reducir ligeramente el consumo energético, sobre todo en Vitoria.

En segundo lugar, se puede afirmar que el calentador eléctrico es el equipo auxiliar menos eficiente, pues en las tres ciudades se puede observar como en los casos 1 y 4 el consumo energético del sistema auxiliar es considerablemente más elevado que en los casos 2 y 5 respectivamente. En los casos 1 y 2 los equipos auxiliares están situados en el interior de la

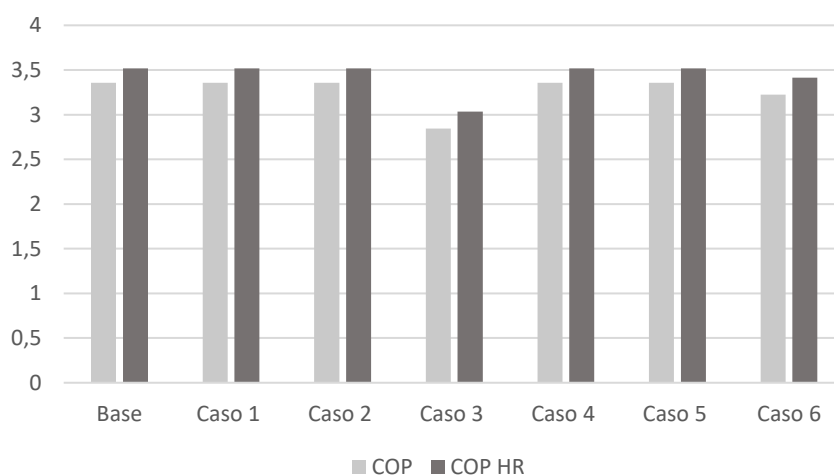
unidad de tratamiento de aire, mientras que en los casos 4 y 5 esos mismos equipos están acoplados al tanque de almacenamiento.

En tercer lugar, se confirma lo que se podía deducir anteriormente al ver que en Vitoria la demanda de calor es mucho mayor que en Valencia o Sevilla, la energía que requiere el sistema de refrigeración en Vitoria es bastante menor que en las otras dos ciudades, por tener una temperatura exterior más baja. En el caso base Vitoria tiene una demanda de energía frigorífica de 253 MW, mientras que en Valencia y Sevilla esta demanda es de 355,7 MW y 383,3 MW respectivamente.

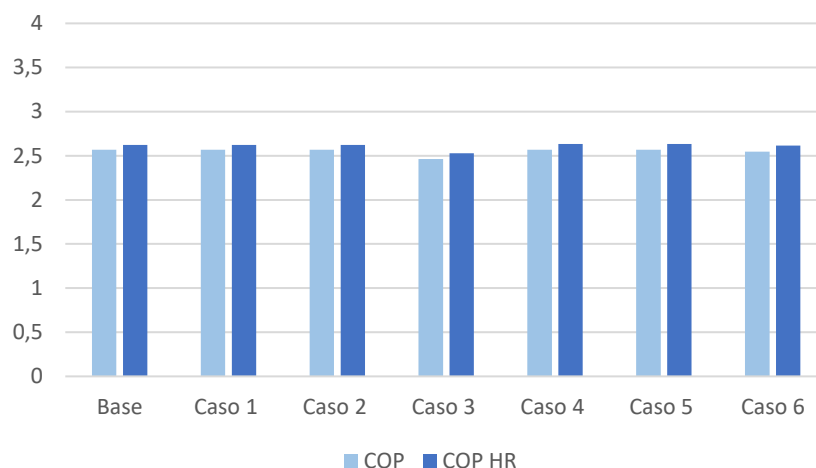
#### 4.1.3. COP

Cuando se habla de ciclos de refrigeración y análisis energéticos es importante fijarse en el COP, el rendimiento del ciclo, la relación entre la potencia frigorífica y el trabajo aportado al compresor.

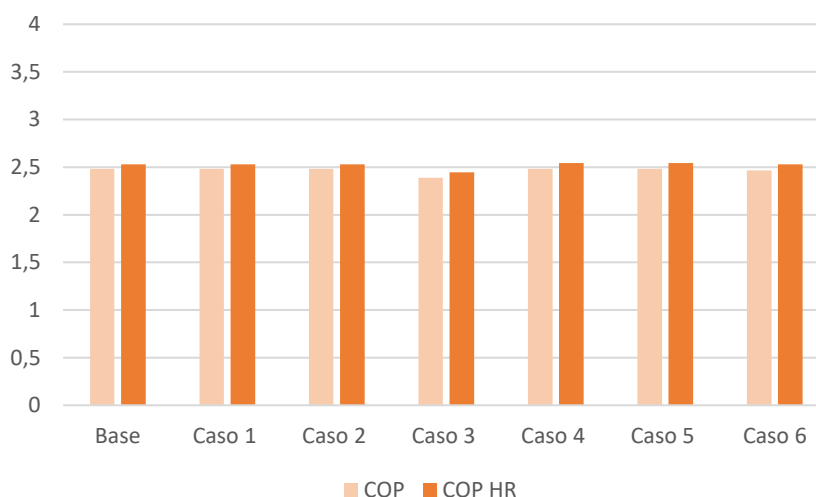
Se representa para cada ciudad y cada caso el COP del sistema de refrigeración antes de la recuperación de calor y después (COP HR).



Gráfica 12. COP Vitoria



Gráfica 13. COP Valencia



Gráfica 14. COP Sevilla

El rendimiento de un ciclo de refrigeración que utiliza CO<sub>2</sub> como refrigerante depende mucho de la temperatura ambiente, pues determina si el ciclo funciona de forma subcrítica o transcítica. Por eso el COP más bajo se encuentra en el sistema del supermercado ubicado en Sevilla, donde la temperatura es más elevada y el ciclo funcionará más tiempo en modo transcítico y los más elevados en Vitoria, ya que los climas fríos favorecen a este tipo de sistemas. Otro factor que influye en el rendimiento es la diferencia de temperatura que haya entre los evaporadores de baja temperatura y el condensador, cuanto más diferencia haya, peor rendimiento tendrá el ciclo. Esto se puede apreciar muy claramente en la diferencia de rendimientos que tiene el mismo sistema de refrigeración en Vitoria o Sevilla.

El COP del sistema de refrigeración aumenta si disminuye la temperatura del refrigerante en la parte de alta presión del ciclo, por tanto si se disminuye esa temperatura aprovechando parte del calor sobrante para calefacción, el COP del sistema aumenta, tal y como se puede observar en las tres gráficas, donde en todos los casos el COP HR es mayor que el COP sin aprovechamiento de calor.

En Vitoria las necesidades de refrigeración no son tan elevadas, y la diferencia de temperatura entre los evaporadores y la temperatura de condensación es más pequeña que en climas cálidos, lo que hace que la eficiencia del sistema sea mayor. Si además se consigue recuperar parte del calor sobrante y reducir la temperatura de condensación, el COP aumenta más que en los otros dos casos.

Tal y como se ha adelantado anteriormente, los casos en los que el COP es más reducido son los casos 3 y 6, ya que en ellos se modifica el funcionamiento del sistema de refrigeración para conseguir recuperar más calor. De esta manera se aumenta el trabajo mecánico de los compresores pero la potencia frigorífica útil se mantiene, ya que no aumenta la demanda frigorífica. Entre ellos, el caso 3 tiene una eficiencia inferior por no contar con el tanque de almacenamiento, que permite acumular el calor recuperado, y aumentar menos el caudal de refrigerante.

De este análisis energético se pueden extraer algunas conclusiones:

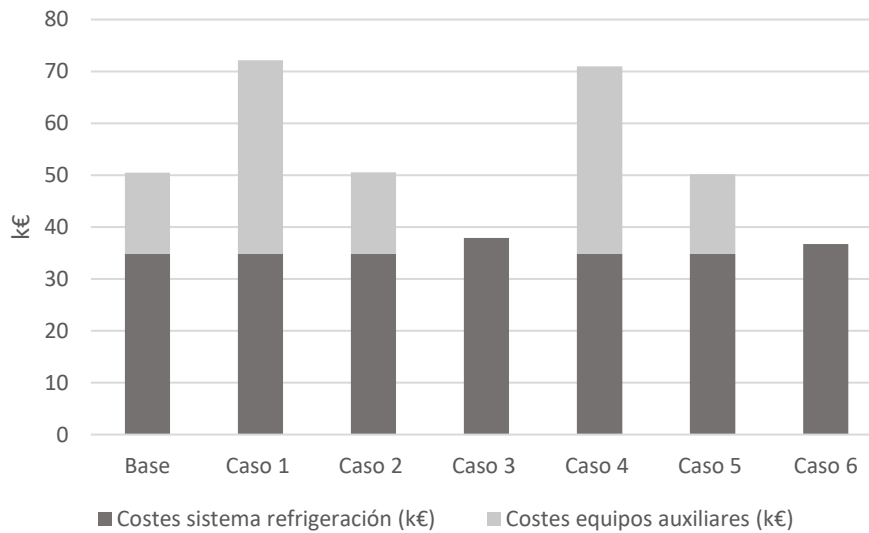
- Observando los consumos de los equipos auxiliares se pueden descartar como opciones viables los casos 1 y 4, pues son los dos casos en los que se utilizan calentadores eléctricos, en el caso 1 acoplado a la unidad de tratamiento de aire y en el caso 4 en el tanque de almacenamiento. Los calentadores eléctricos consumen más energía que las bombas de calor, por eso resulta más interesante estudiar los casos 2 y 5, en caso de querer contar con equipos auxiliares.
- En Valencia o Sevilla la diferencia entre el caso 3 y el 6 es muy pequeña, pero en climas más fríos como el de Vitoria, se aprecia como en el caso 6 el consumo energético es menor que en el caso 3 y el COP mayor, por lo que se puede deducir que en lugares donde la demanda de calor es elevada y la de refrigeración es relativamente baja, compensa tener un tanque de almacenamiento para mantener el calor recuperado de manera más eficiente.
- En ciudades con temperaturas exteriores suaves en invierno como Valencia o Sevilla, los casos que mayor rendimiento presentan, aunque las diferencias son muy ligeras, son el 4 y el 5, en los que el sistema de calefacción se compone de un tanque de almacenamiento con un equipo auxiliar, calentador eléctrico o bomba de calor aire – agua respectivamente, y la unidad de tratamiento de aire. El caso que presenta menor consumo energético global, teniendo en cuenta los sistemas de refrigeración y de calefacción también es el caso número 5, que además presenta un porcentaje de energía recuperada respecto a la demandada de alrededor del 80 %. Energéticamente, la mejor solución de refrigeración por CO<sub>2</sub> y calefacción conjuntas para climas cálidos es contar con un sistema de recuperación de calor consistente en un tanque de almacenamiento con una bomba de calor aire – agua como equipo auxiliar.
- En Vitoria, una ciudad con temperaturas más bajas, los casos 4 y 5 también son los que presentan mejor COP, aunque la diferencia es mínima con los casos 1 y 2. En cuestión de consumo energético, el que presenta un valor más bajo es el 5, sin embargo la diferencia con el caso 2 es muy pequeña, y ambos casos poseen un porcentaje muy parecido de energía recuperada respecto a la demandada. Para climas como el del norte de España el caso 5 es también la mejor solución energéticamente, aunque las

diferencias con el siguiente caso, el 2, con una bomba de calor aire – aire acoplada en la unidad de tratamiento de aire, son muy pequeñas.

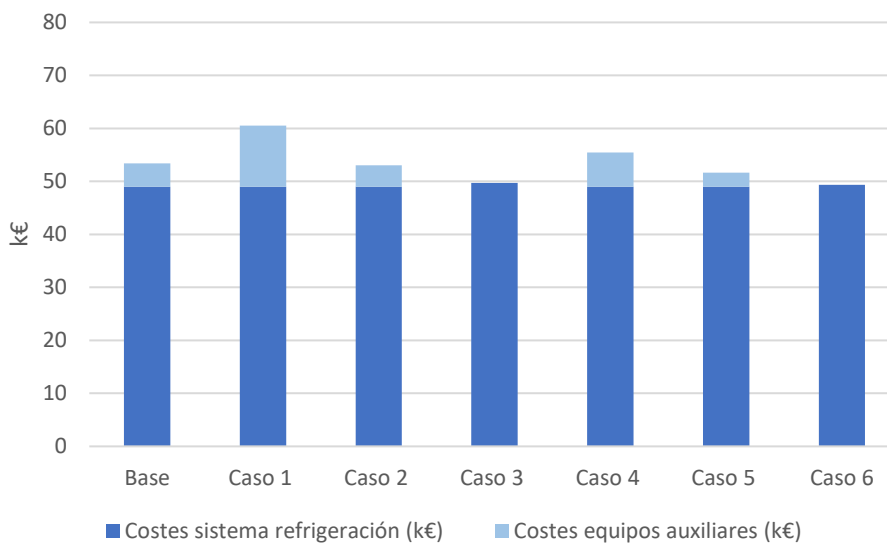
El análisis energético ha proporcionado mucha información sobre consumo y eficiencia, pero no es lo único en lo que se debe basar una elección de un sistema tan importante para un supermercado como son los sistemas de refrigeración y calefacción, por lo que se van a estudiar las consecuencias económicas y medioambientales de cada caso.

#### 4.2. RESULTADOS ECONÓMICOS

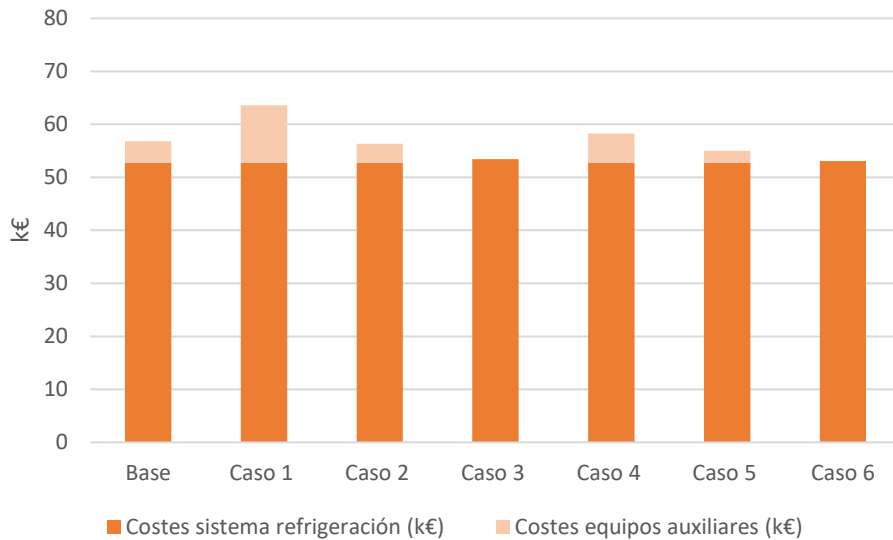
Los costes asociados a cada caso se han calculado con los precios de la energía que se han obtenido en el capítulo 2. Estos costes únicamente reflejan el desembolso que supone la energía que se consume en cada una de las opciones de refrigeración y calefacción, no los precios de los equipos.



Gráfica 15. Costes Vitoria



Gráfica 16. Costes Valencia



**Gráfica 17. Costes Sevilla**

Se puede observar como en las tres ciudades los costes de refrigeración apenas sufren variaciones de un caso a otro, aumentando ligeramente en los casos 3 y 6, en los que se modifica el punto de funcionamiento del ciclo con los evaporadores de media temperatura, y por tanto se requiere más energía para trasegar un mayor flujo másico de refrigerante.

En cuanto a los sistemas auxiliares de calefacción, el calentador eléctrico, utilizado en los casos 1 y 4, acoplado a la unidad de tratamiento de aire o al tanque de almacenamiento, es el equipo que resulta más caro, pues consume más energía que la bomba de calor, tal y como se ha visto en el apartado anterior.

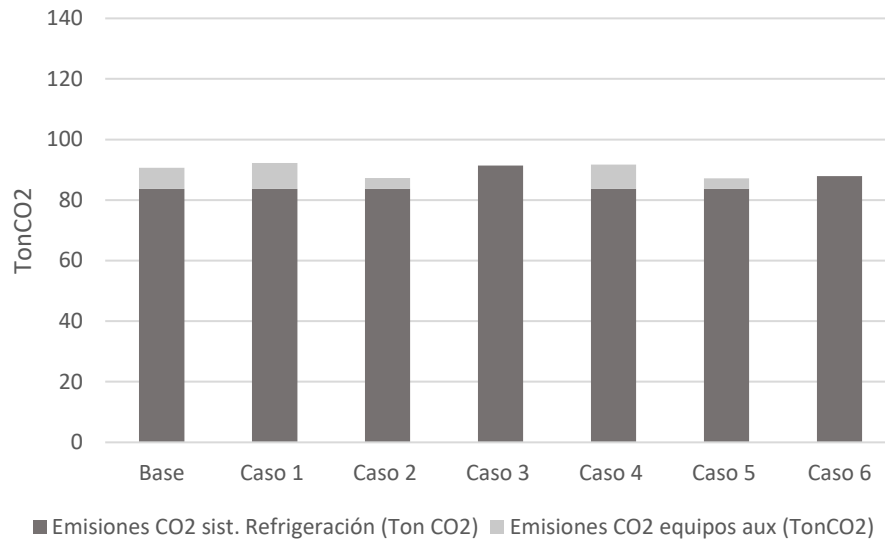
Los casos que resultan más económicos en las tres ciudades son los casos 3 y 6, en los que no es necesaria la utilización de equipos auxiliares para el sistema de calefacción, aunque se debe tener en cuenta que en los casos 4, 5 y 6 se requiere de un tanque de almacenamiento, lo que elevará un poco la inversión inicial, en comparación con los casos 1, 2 y 3.

En los climas cálidos la diferencia de costes, exceptuando los casos en los que se utilizan calentadores eléctricos, no es muy elevada, pues como se ha visto en el apartado 4.1.2, los equipos auxiliares no consumen mucha energía debido a la baja demanda de calefacción. No obstante, en Vitoria se ve que la diferencia entre los costes de cada caso es más acusada, pues se requiere más energía de los equipos auxiliares para satisfacer la demanda calorífica.

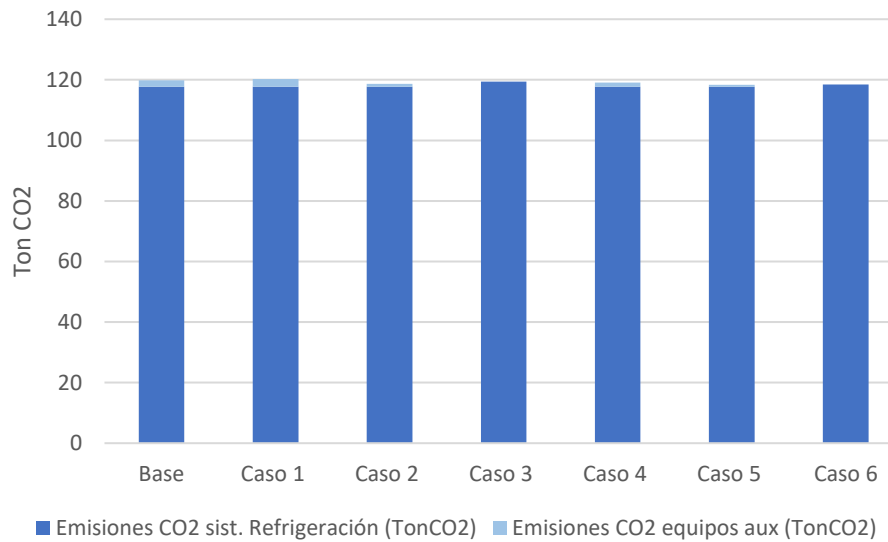
### 4.3. RESULTADOS MEDIOAMBIENTALES

El impacto medioambiental de cada caso de estudio se va a medir con las emisiones de CO<sub>2</sub> que se generarían en cada opción de aprovechamiento del calor. Es posible hacer estos cálculos pues dos de las variables de entrada que se han introducido en la página web son los factores de paso de energía final (gas natural y electricidad) a kilogramos de CO<sub>2</sub> emitidos. A continuación se muestra para cada ciudad, las emisiones de CO<sub>2</sub> que produce el sistema de refrigeración y las que producen los sistemas auxiliares.

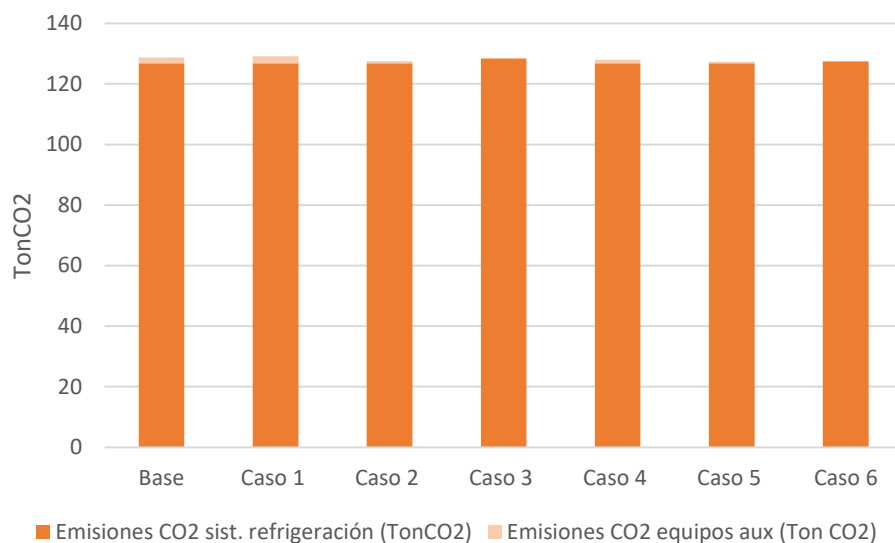




Gráfica 18. Emisiones de CO2 Vitoria



Gráfica 19. Emisiones de CO2 Valencia



**Gráfica 20. Emisiones de CO2 Sevilla**

Lógicamente, cuánta más energía se consume, más toneladas de CO<sub>2</sub> se emiten al ambiente. Esto quiere decir que al ser Sevilla la ciudad en la que más energía es necesaria para los sistemas de refrigeración y calefacción a causa de su temperatura exterior, es también la ciudad en la que más CO<sub>2</sub> se expulsa al ambiente, con un máximo de 129,2 Ton de CO<sub>2</sub> en el caso 1, mientras que en Vitoria, la ciudad con menos emisiones, el máximo es de 92,2 Ton de CO<sub>2</sub>.

Puesto que la producción de dióxido de carbono es directamente proporcional al consumo, se observa una tendencia en los casos de estudio muy similar a la que se ha explicado en el apartado 4.1; el caso menos perjudicial para el medio ambiente es el caso número 5, en el que el sistema de calefacción está compuesto por un tanque de almacenamiento cuya temperatura mantiene una bomba de calor aire – agua y una unidad de tratamiento de aire.

Igual que sucedía en el análisis energético, la diferencia de emisiones entre los casos de Valencia y Sevilla es muy ligera, mientras que en Vitoria, al tener mayores diferencias de consumo entre sus casos, también tiene más variaciones de emisiones.

#### 4.4. CONCLUSIONES

En este trabajo académico se ha pretendido analizar el comportamiento de un ciclo de refrigeración con CO<sub>2</sub> de un supermercado cuando se utilizan seis técnicas para la recuperación del calor sobrante de la parte de alta presión del sistema, en tres ciudades con climas diferentes en España. Para ello, se ha diseñado un supermercado tipo en DesignBuilder, y se ha realizado una simulación en este programa para obtener la demanda de calor del edificio, para cada una de las tres ciudades españolas, Vitoria, Valencia y Sevilla. Una vez obtenida la demanda calorífica y junto con los datos climáticos de las ciudades, precios de la energía y emisiones de CO<sub>2</sub>, se ha utilizado una herramienta de simulación en formato web para realizar los cálculos energéticos, económicos y medioambientales a lo largo de un año. Estos resultados son los que se han representado de manera gráfica y se han explicado a lo largo de este último capítulo.

Una de las primeras conclusiones a las que se ha llegado, es que utilizar como sistema auxiliar calentadores eléctricos no es una solución viable, ya que es el equipo auxiliar que más consume,

y por tanto el que más emisiones de CO<sub>2</sub> genera y mayores costes tiene. Por tanto las decisiones sobre qué métodos para recuperar calor son mejores dependiendo del clima se han basado en analizar los casos con bomba de calor como equipos auxiliar y tanque de almacenamiento.

Se ha podido observar que en ciudades con temperaturas exteriores suaves a lo largo del año como son Valencia y Sevilla, las conclusiones son muy similares. El caso estudiado de recuperación de calor que menor consumo supone, aunque la diferencia es pequeña, y por tanto menores emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, es el caso número 5, que consiste en calentar el agua de un tanque de almacenamiento con el calor recuperado y con una bomba de calor aire – agua como equipo auxiliar. Posteriormente el agua caliente es dirigida al intercambiador de calor situado en la unidad de tratamiento de aire, que calienta el aire del supermercado. Pese a ser la estrategia con menor consumo y emisiones, no es la de menor coste. El caso que presenta costes más reducidos es el caso 6, en el que se modifica el punto de funcionamiento del sistema de refrigeración para recuperar más calor y almacenarlo en un tanque de agua de 2,5 m<sup>3</sup>, aunque el caso 3 presenta costes muy similares.

En una ciudad como Vitoria, en cuestión de consumo y eficiencia del sistema, los casos 2 y 5 se encuentran prácticamente igualados, ambos sistemas utilizan una bomba de calor, en el caso 2 se trata de una bomba de calor aire – aire acoplada en la unidad de tratamiento de aire y en el caso 5 la bomba es aire- agua y se encuentra en el tanque. En cuanto a los costes de la energía, el caso más económico es también el 6, con mayor diferencia que en las ciudades más cálidas.

En las ciudades con climas más calurosos, la diferencia de consumos y costes en los casos en los que se ha utilizado o no el tanque de almacenamiento es muy pequeña, prácticamente insignificante. Sin embargo en ciudades como Vitoria, en el caso 6 se tiene menor consumo que en el 3, en el que se modifica el punto de funcionamiento sin contar con un tanque de almacenamiento, y es el caso más competitivo en cuestión de costes. Por tanto, se puede concluir que en ciudades con demanda calorífica elevada y demanda de refrigeración baja, es decir, en climas fríos, la utilización de un sistema de recuperación de calor con tanque de almacenamiento es la opción más económica.

## **PRESUPUESTO**

Análisis energético, económico y medioambiental de diferentes sistemas de calefacción con recuperación de calor en supermercados

El presupuesto que se va a presentar a continuación es el cómputo de las actividades, materiales y licencias que se han necesitado para realizar este trabajo de final de máster. Para elaborar este estudio no se ha necesitado ejecutar pruebas de campo, desplazamientos o ensayos, por lo que el importe corresponde únicamente al desempeño personal y el gasto en material.

Las licencias de los programas que se han utilizado, así como las consultas bibliográficas, han resultado gratuitas por ser estudiante de la Universidad Politécnica de Valencia, sin embargo, se van a presupuestar las partidas suponiendo que este estudio lo realizase una persona ajena a la universidad, como podría ser una ingeniera industrial ya titulada.

CÓDIGO	CANTIDAD	UNIDADES	DESCRIPCIÓN	PRECIO	TOTAL	IMPORTE
MAT01	20	ud	Material de papelería	0,05	1	
MAT02	300	h	Ordenador	0,06	18	
						19
DAT01	3	ud	Archivos climáticos epw	0	0	
DAT02	10	ud	Consultas bibliográficas	35	350	
						350
LIC01	1	ud	Licencia Office	69	69	
LIC02	1	ud	Licencia CoolPack	0	0	
LIC03	1	ud	Licencia DesignBuilder	1250	1250	
						1319
DES01	300	h	Ingeniera industrial	14	4200	
						4200
					Material	19
					Datos	350
					Licencias	1319
					Desarrollo	4200
					<b>TOTAL</b>	<b>5888</b>



## **BIBLIOGRAFÍA**

Sarabia, E. (2020) «HR\_CO2 Emilio J. Sarabia Escriva»

[http://personales.upv.es/emsaes/devs\\_2020/example.html](http://personales.upv.es/emsaes/devs_2020/example.html)

Sarabia, E.; Acha, S.; LeBrun, N.; Soto, V.; Pinazo, J.; Markides, C.; Shah, N. (2019) «Modelling of a real CO<sub>2</sub> booster installation and evaluation of control strategies for heat recovery applications in supermarkets»

<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.08.005>

Karampour, M.; Sawalha, S.; Arias J. (2016). «Supermercados sostenibles: una descripción general»

<https://static1.squarespace.com/static/570f6f4f59827e4170b485f3/t/5b8805ec8a922dbc729546af/1535641081095/D2.2+Supermercados+ecolo%CC%81gicos+Una+descripcio%CC%81n+general.pdf>

Sánchez, D. (2018). «Tendencias de las tecnologías de refrigeración para supermercados». IX Congreso Ibérico. Ciencias y técnicas del frío.

[https://www.researchgate.net/publication/334224802\\_TENDENCIAS\\_DE\\_LAS\\_TECNOLOGIAS\\_DE\\_REFRIGERACION\\_PARA\\_SUPERMERCADOS](https://www.researchgate.net/publication/334224802_TENDENCIAS_DE_LAS_TECNOLOGIAS_DE_REFRIGERACION_PARA_SUPERMERCADOS)

UE 517/2014. (2014) «Reglamento (UE) nº 517/2014 del parlamento europeo y del consejo de 16 de abril de 2014 sobre los gases fluorados de efecto invernadero y por el que se deroga el Reglamento (CE) n o 842/2006»

<https://www.boe.es/doue/2014/150/L00195-00230.pdf>

Mota-Babiloni, A.; Navarro-Esbrí, J.; Barragán-Cervera, A.; Molés, F.; Peris, B.; Verdúa, G. (2015) «Análisis basado en el reglamento (UE) Nº 517/2014 del R448A como fluido de bajo PCA alternativo al R404A»

[https://www.researchgate.net/publication/280132151\\_Analisis\\_basado\\_en\\_el\\_Reglamento\\_U\\_E\\_No\\_5172014\\_del\\_R448A\\_como\\_fluido\\_de\\_bajo\\_PCA\\_alternativo\\_al\\_R404A#:~:text=El%20refrigerante%20R404A%20es%20el,conocido%20tambi%C3%A9n%20como%20refrigeraci%C3%B3n%20comercial](https://www.researchgate.net/publication/280132151_Analisis_basado_en_el_Reglamento_U_E_No_5172014_del_R448A_como_fluido_de_bajo_PCA_alternativo_al_R404A#:~:text=El%20refrigerante%20R404A%20es%20el,conocido%20tambi%C3%A9n%20como%20refrigeraci%C3%B3n%20comercial)

Gullo, P.; Tsamos, K.; Hafner, A.; Ge, Y.; Tassou, S. (2017) «State of the art technologies for transcritical R744 refrigeration systems – a theoretical assessment of energy advantages for European food retail industry»

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217328576>

Sawalha, S. (2012) «Investigation of heat recovery in CO<sub>2</sub> trans-critical solution for supermarket refrigeration»

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140700712002800>

Fidora, N.; Braunchweig, TU. (2016) «Herramientas informáticas para la planificación de supermercados»

Arias, J.; Lundqvist, P. (2005) «Heat recovery and floating condensing in supermarkets»

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778805000757>