



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA PRODUCCIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA MEDIANTE EL USO DE BOMBA DE CALOR

AUTOR: GUILLERMO GARCÍA GONZÁLEZ

TUTOR: DR. D. EMILIO NAVARRO PERIS

COTUTORA: D^{ña}. ESTEFANÍA HERVÁS BLASCO

Curso académico: 2017-18

RESUMEN

En el presente documento se detalla el proyecto de diseño de una bomba de calor de CO₂ para agua caliente sanitaria (ACS). Con el objetivo de concretar el contenido del mismo, se dispone a continuación de una breve síntesis de las partes que lo conforman.

En primer lugar se ha realizado una introducción donde se establece el marco en el que se sitúa el proyecto y los argumentos que han promovido su realización. También se incluye un apartado con la normativa vigente relativa a las partes que se tratan, y finalmente un apartado donde se especifica el caso concreto para el que se ha realizado el diseño de la bomba.

Seguidamente, se han expuesto los cálculos necesarios para la realización del modelo de la bomba, y se ha especificado el procedimiento seguido para la optimización de la misma dentro del sistema de ACS.

Como cierre del proyecto se realiza una valoración de los resultados obtenidos de la simulación del sistema, tanto para la bomba diseñada (CO₂), como para la bomba de propano, con la que será comparada. Finalmente, se ha presentado, a modo de conclusión, una comparativa de las bombas de calor simuladas, frente a una caldera de gas. Esto permitirá ver una visión global de las diferencias existentes entre éstas tecnologías y sus rendimientos a la hora de abastecer una demanda.

ÍNDICE GENERAL

Documento 1: **MEMORIA.**

Documento 2: **PLIEGO DE CONDICIONES.**

Documento 3: **PRESUPUESTO.**

1. MEMORIA

ÍNDICE

1.1. INTRODUCCIÓN.	11
1.1.1. OBJETO DEL PROYECTO.....	11
1.1.2. MARCO ENERGÉTICO.	12
1.1.3. PRODUCCIÓN DE ACS.	14
1.1.4. CO2: REFRIGERANTE NATURAL.	18
1.2. NORMATIVA.....	22
1.3. ÁMBITO DE APLICACIÓN.....	23
1.3.1. Caso objeto del presente proyecto.....	23
1.4. DISEÑO DE LA BOMBA.....	25
1.4.1. DIMENSIONADO DE LOS COMPONENTES DE LA BOMBA DE CALOR.	25
1.4.2. DISEÑO DEL MODELO.....	26
1.4.2.1. Búsqueda de los puntos óptimos.	26
1.4.2.2. Obtención de las ecuaciones del modelo.....	27
1.5. COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA DENTRO DEL SISTEMA DE ACS.	35
1.5.1. DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE ACS.	35
1.5.2. INTRODUCCIÓN DE LAS CONDICIONES PARA LA SIMULACIÓN.....	36
1.5.3. EVALUACIÓN DE LA BOMBA.....	38
1.5.3.1. Casos de estudio. Bomba de CO2.....	38
1.5.3.1.1. Caso inicial. CO2.....	38
1.5.3.1.2. Caso 1. CO2.	40
1.5.3.2. Casos de estudio. Bomba de Propano.....	44
1.5.3.2.1. Caso inicial. Propano.....	44
1.5.3.2.2. Caso 1.Propano.	47
1.5.3.2.3. Caso 2.Propano.	49
1.5.4. Casos de estudio. Caldera de Gas Natural.	51
1.6. CONCLUSIONES.....	52
1.6.1.1. Bomba de CO2 vs bomba de Propano.....	52
1.6.1.2. Distinción tarifaria.	53
1.6.1.3. Bomba de calor vs Caldera de gas.....	55
1.7. BIBLIOGRAFÍA.	57
1.8. LISTA DE TABLAS.....	59
1.9. LISTA DE FIGURAS.....	59

1.1. INTRODUCCIÓN.

1.1.1. OBJETO DEL PROYECTO.

El objetivo de este proyecto, es el **diseño de una bomba de calor agua-agua de CO₂, con recuperación de calor, para la producción de agua caliente sanitaria (ACS)**. Una vez diseñada la bomba, **ésta será evaluada dentro de un sistema completo de producción de ACS**, que constará de tres elementos fundamentales: la bomba de CO₂, un intercambiador de calor, el cuál recuperará el calor de las aguas grises que genere la propia edificación, y de un depósito de acumulación para el agua de consumo, con el objetivo de encontrar las características que hacen que el sistema funcione de forma óptima.

Para alcanzar el objetivo marcado, se deberá realizar una primera parte de cálculo, donde **se dimensionarán los componentes principales de la bomba de calor, teniendo en cuenta que el ciclo será transcrito**, debido a que se trabajará por encima de su punto crítico (31°C, 73.6 bar). Posteriormente, se realizará el **modelo de la bomba que será finalmente optimizado** dentro del sistema de ACS, hasta lograr que las siguientes variables sean las óptimas, para abastecer la demanda establecida:

1. **Tamaño de la bomba.**
2. **Volumen del depósito de acumulación.**

Para poder realizar dicha optimización **se establecerán varios escenarios de funcionamiento**: un caso de referencia, con la bomba trabajando 24 horas, y otros dos casos, en los que se fijarán las horas de funcionamiento de la máquina.

Una vez obtenidos los resultados para el CO₂, **se repetirá el mismo procedimiento con un modelo de bomba de propano**, lo que nos permitirá comparar las eficiencias y consumos de ambas opciones. **Además se añadirá una comparativa de ambas bombas frente a una caldera de gas convencional.**

1.1.2. MARCO ENERGÉTICO.

España, como país miembro de la Unión Europea, busca la mejora de su sistema energético, con el objetivo de lograr una transición energética hacia una economía baja en carbono, es decir, reducir el uso de los combustibles fósiles. El Consejo Europeo establece una serie de objetivos para el año 2030, en busca de una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y una mejora del marco energético europeo, destacando tres puntos básicos [1]:

- Reducción de al menos un **40% de emisiones de gases de efecto invernadero**.
- Aumento de la cuota de **energías renovables mayor o igual al 27%**.
- Mejora de la **eficiencia energética al menos del 27%**.

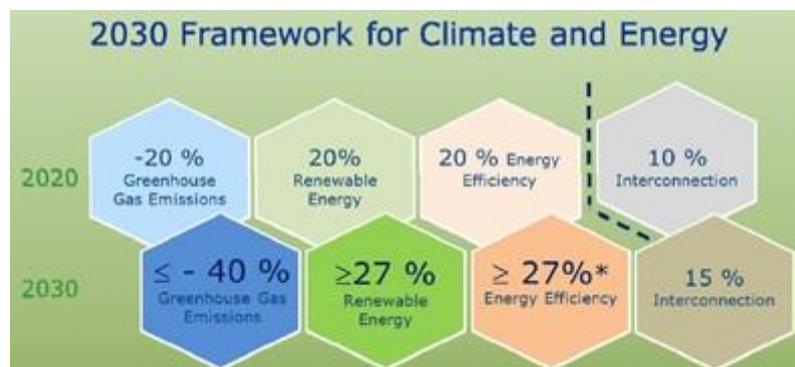


Figura 1. Marco estratégico en materia de clima y energía de la Unión Europea para los años 2020 y 2030 [2].

La Agencia Internacional de Energía plantea la eficiencia energética como uno de los instrumentos fundamentales para conseguir reducir las emisiones globales, al igual que la limitación del incremento de la temperatura del planeta, en resumen, aplacar el cambio climático.

Dentro del sistema energético español, el sector residencial ocupa el tercer puesto en cuanto a consumo final de energía, lo que representa casi un 20% del consumo energético total del país. Sin embargo, más de la mitad de esta demanda energética (59,5%) es cubierta mediante combustibles, tanto fósiles como de origen renovable. La electricidad por su parte ha ido creciendo en importancia a la hora de cubrir la demanda de los hogares en España, intentando así que el porcentaje de los combustibles fósiles en este sector se vea reducido [3].

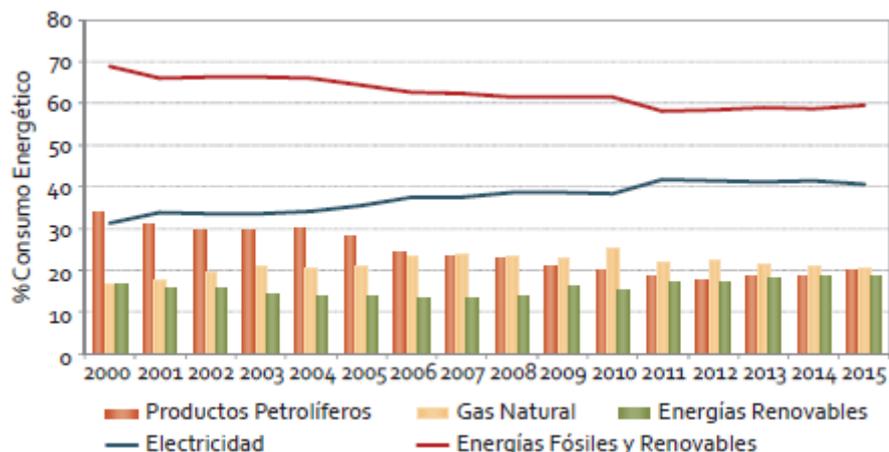


Figura 2. ESTRUCTURA DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE LOS HOGARES POR FUENTES ENERGÉTICAS, 2000-2015 [3].

El peso que tienen los combustibles en el mapa energético residencial se centra principalmente en el uso térmico, donde destaca la calefacción, además de la producción de agua caliente sanitaria (ACS), entre otros. Cabe mencionar el incremento de la demanda de calefacción, como resultado de las bajas temperaturas de los últimos inviernos. La mayoría de equipos de este tipo funcionan con combustibles fósiles, los cuales tienen unos índices contaminantes elevados, teniendo eficiencias no muy destacables [3].

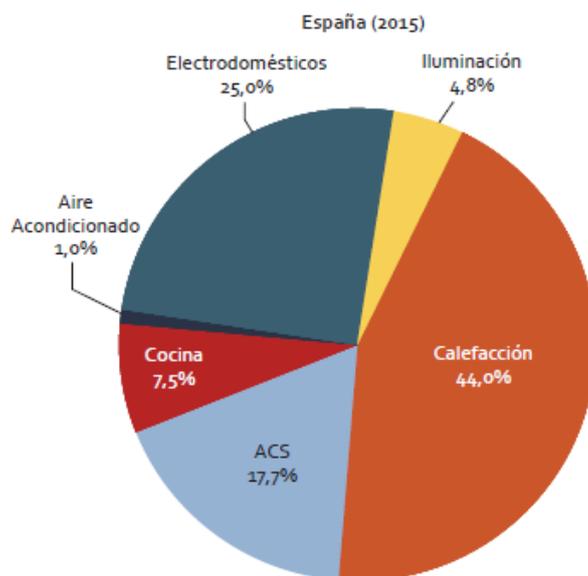


Figura 3. ESTRUCTURA DE CONSUMO DE ENERGÍA POR USOS DEL SECTOR RESIDENCIAL EN ESPAÑA [3].

Parte del problema se ha empezado a resolver mediante la mejora de la envolvente térmica de los edificios, lo que ayuda a reducir la demanda de los aparatos de acondicionamiento del ambiente en los hogares, tanto en las estaciones cálidas como en las frías, junto con la instalación de equipos más eficientes. **En cuanto a la demanda de ACS, no es un parámetro reducible, ya que las condiciones a las que se consume éste agua son fijas, por lo que el potencial de mejora se encuentra en la eficiencia de los equipos y de los sistemas en su conjunto.**

1.1.3. PRODUCCIÓN DE ACS.

Los equipos de producción de ACS siguen siendo mayoritariamente equipos que emplean combustibles. En el mercado existen varias alternativas de producción de agua caliente sanitaria, los más populares son los calentadores por combustión, según el combustible que empleen, y los eléctricos. No obstante, además de los dos principales, ya mencionados, existen otras alternativas, como son los calentadores solares y las bombas de calor.

Actualmente, la normativa establece una contribución mínima de energía solar térmica en las instalaciones térmicas de las edificaciones para el calentamiento de agua [4], los cuales deben ir complementados con equipos convencionales para cubrir aquellos puntos donde el equipo solar no sea suficiente.

Opciones de producción:

Calentadores por combustión, combustibles gaseosos: gas natural, butano/propano; sólidos: carbón, leña, biomasa y similares; líquidos: gasóleo, biodiesel. Estos calentadores calientan de forma instantánea, es decir, que una vez se produce la demanda, el agua de red entra al circuito, normalmente un serpentín, a la vez que se prende la llama, la cual calienta de forma directa el mencionado circuito, haciendo que el agua alcance la temperatura de consumo. La base del funcionamiento de estos equipos son casi idénticas, lo que cambia es el combustible que permite generar la llama, y por tanto sus rendimientos serán diferentes, al igual que sus prestaciones.

Calentadores eléctricos. Su funcionamiento consiste, básicamente, en una resistencia eléctrica ubicada dentro de un depósito de acumulación. El depósito se llena de agua de red, fría, que es calentada por la resistencia hasta alcanzar una temperatura establecida, bien por el fabricante o en la mayoría de los modelos puede ser regulada por el consumidor. Una vez alcanzada la

temperatura objetivo se detiene la resistencia, y el agua queda a la espera de la demanda de la vivienda. Dentro del depósito se produce una estratificación del agua, situándose la zona más caliente en la parte superior, por donde se extrae, mientras que por la parte inferior se sitúa la capa más fría y por tanto más densa, en la zona de llenado del termo.

Calentadores solares. Se basan en un captador de radiación solar, instalado de forma que esté expuesto la mayor parte del día al sol. Esta energía capturada es transmitida al agua que circular por un circuito de tubos bajo el captador, y posteriormente es almacenada en un depósito, del que se alimentaría a la instalación de la vivienda. Como ya se ha comentado, estos sistemas requieren de equipos auxiliares, generalmente calentadores de gas, por lo que penaliza notablemente el objetivo de tener un sistema lo más renovable posible.

Bombas de calor. Al contrario que el resto de sistemas mencionados hasta ahora, estos equipos se basan en el transporte de energía entre dos entornos. Cuando actúan como sistemas de producción de ACS, extraen energía del agua de red, y posteriormente se la transmiten de nuevo, haciendo que esta aumente su temperatura hasta un valor adecuado para su consumo.

Lo más destacable de las bombas de calor es que producen mucha más energía de la que consumen, por lo que no sólo producen un ahorro energético sino también un ahorro económico. Además, la Directiva Europea establece que, a partir de un valor del *coeficiente de eficiencia medio estacional (SPF)* del 2.5, estas máquinas pueden considerarse como renovables [5].

Por otro lado, los sistemas de bomba de calor son muy versátiles, ya que son fácilmente combinables con otros sistemas de producción de energía. Generalmente es interesante la combinación de sistemas de generación de energía eléctrica de forma renovable junto con el sistema de la bomba de calor para la producción de la energía térmica, en este caso particular para ACS, ya que de esta forma sería, en su conjunto, un sistema totalmente renovable.

Independientemente del sistema instalado para la producción de ACS, ésta puede clasificarse en tres principales grupos, según el tipo de producción del agua caliente [6]:

- Producción instantánea. Opción menos rentable, ya que requiere de una bomba capaz de abastecer la demanda en las horas de mayor consumo de forma inmediata, lo que implica un consumo de gran cantidad de energía eléctrica, además de que en el resto de puntos de trabajo será un sistema sobredimensionado, que trabajará muy por debajo de su capacidad.

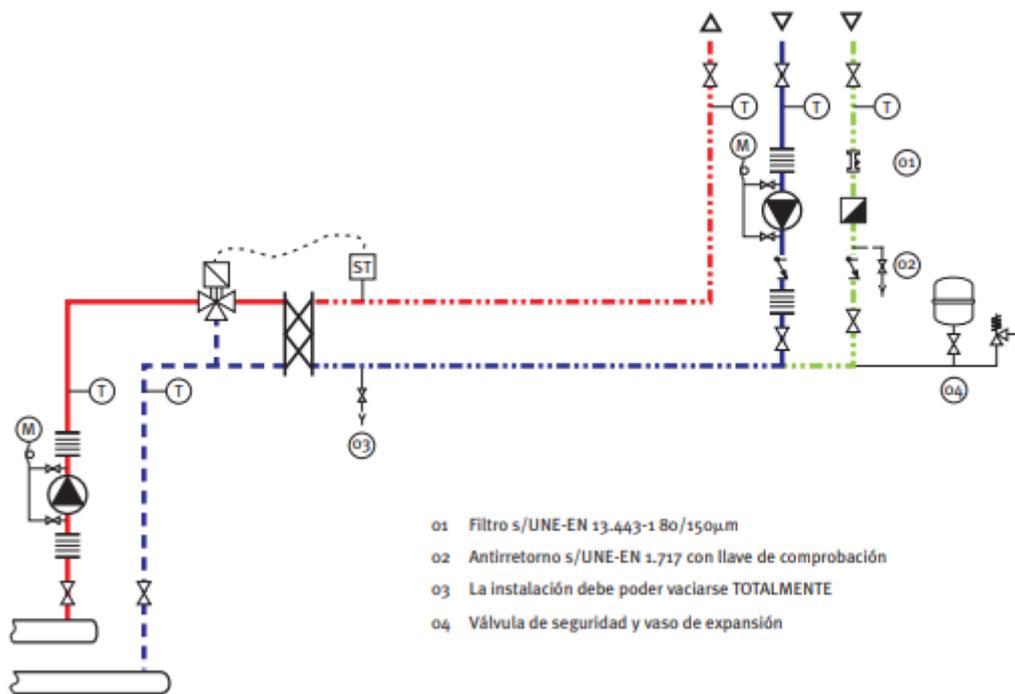


Figura 4. Esquema de producción instantánea de ACS [6].

- Producción con acumulación.
 - Sistemas con interacumuladores. El depósito acumulador contiene un serpentín a modo de intercambiador, donde se producirá el calentamiento del agua acumulada. Esta opción suele emplearse en aplicaciones de pequeñas dimensiones, debido a las limitaciones de área de intercambio de calor que implica tener el intercambiador dentro del depósito acumulador.

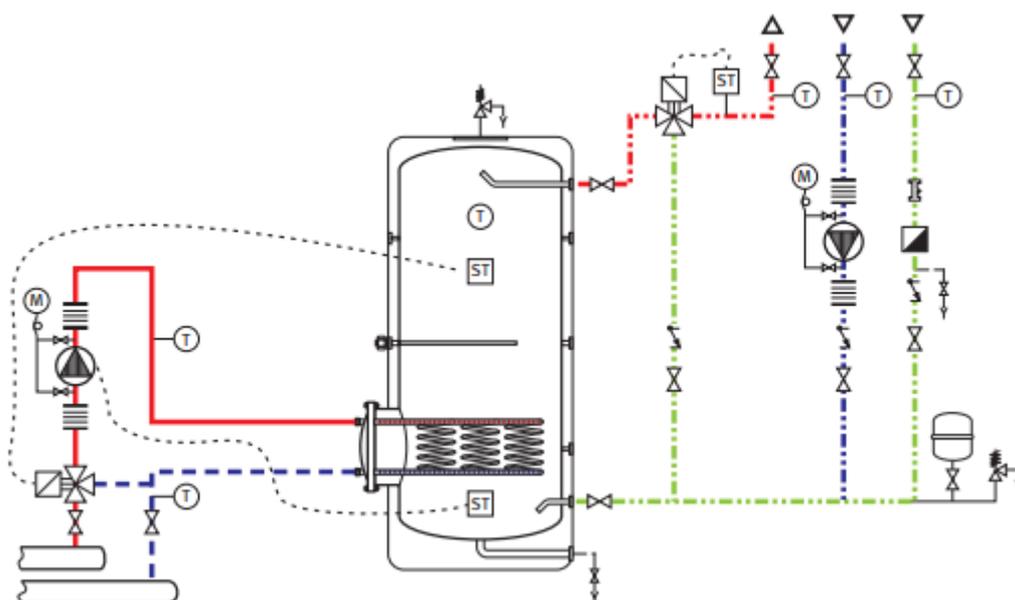


Figura 5. Producción de ACS con interacumulador [6].

- Sistemas con acumuladores. En estos sistemas el calentamiento del agua se produce mediante un intercambiador previo a la entrada del acumulador, por lo que la función de los depósitos es exclusivamente la de almacenar el agua a la temperatura establecida, normalmente superior a la de consumo (debido a las pérdidas).

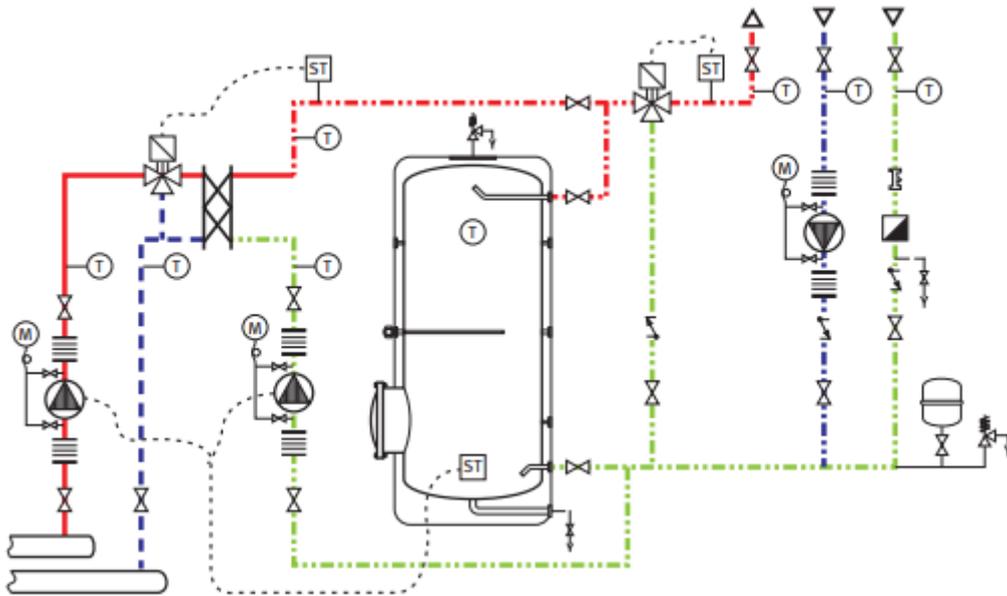


Figura 6. Producción de ACS con acumulador [6].

La producción con acumulación tiene una serie de ventajas respecto a la producción instantánea, y son las siguientes:

- Permite producir el agua de consumo en horas de coste de energía bajo, y mantenerla en las condiciones óptimas hasta que sea requerida por los consumidores.
- Permite que la bomba de calor sea de menor potencia, y por tanto de menor tamaño y menor coste, lo que supone un ahorro energético y económico.

1.1.4. CO2: REFRIGERANTE NATURAL.

Actualmente el CO2 se presenta como una alternativa en auge como fluido refrigerante, debido principalmente a su condición de refrigerante natural, con un impacto medioambiental casi nulo, lo que lo diferencia del resto de refrigerantes comunes, que están siendo descartados por la Unión Europea por sus elevados efectos negativos sobre el medioambiente.

En la siguiente tabla podemos ver una comparativa del impacto del CO2 respecto a otros refrigerantes [7]:

<i>Refrigerante</i>	R744 (CO2)	R134a	R404a
<i>Potencial de agotamiento del ozono (PAO)</i>	0	0	0
<i>Potencial de calentamiento atmosférico (PCA)</i>	1	1430	3922

Tabla 1. Comparativa del impacto medioambiental del CO2.

Además, el CO2 posee las siguientes características [8]:

- Es un elemento fácilmente extraíble, ya que se encuentra presente en el ambiente. Este gas es uno de los causantes del efecto invernadero, sin embargo, para este tipo de usos el gas empleado procede de otros procesos industriales, por lo que supone un reciclaje del mismo.
- El coste de este gas es muy bajo, ya que su obtención es sencilla.
- Es un fluido que no es inflamable y de baja toxicidad, por lo que es muy poco peligroso. No obstante, en el caso de producirse una fuga en un lugar no ventilado, su acumulación produciría el agotamiento del oxígeno de dicho recinto, por lo que es un aspecto a tener en cuenta.
- Al ser un gas inerte, no es un fluido agresivo con los materiales de los componentes metálicos o plásticos con los que puede entrar en contacto en el sistema en el que se emplee.
- Tiene un coeficiente de transferencia de calor alto, y puede trabajar en condiciones de temperaturas exteriores muy bajas, en torno a -20°C.

1.1.5. MOTIVACIÓN.

¿Por qué un sistema de Bomba de calor para la producción de ACS?

Como se ha comentado anteriormente en este documento, el **Código Técnico de la Edificación**, en uno de sus Documentos Básicos (DB-HE4), **exige un mínimo porcentaje de energía solar térmica en las nuevas instalaciones de ACS**. Los sistemas de solar térmica tienen el inconveniente de requerir un espacio amplio para su instalación, lo que también afecta a la estética de la vivienda, además de que un mal mantenimiento, a la larga, provoca que el sistema no funcione correctamente y la aportación del sistema auxiliar sea mayor, y por tanto se pierda el objetivo de lograr un sistema energético ecológico.

Sin embargo, en el mismo documento, establece que **ésta energía puede obtenerse mediante una instalación alternativa**, siempre y cuando se justifique adecuadamente que dicha instalación tenga unas emisiones de CO₂ y un consumo global, incluyendo sus sistemas auxiliares, iguales o inferiores a las de la instalación solar térmica correspondiente **[4]**. Frente a todo esto, la bomba de calor se presenta como una de las mejores alternativas, la cual es, además, compatible con equipos de solar térmica, como también se ha comentado con anterioridad.

Otro argumento para decantarnos por la bomba de calor lo podemos encontrar en las últimas estadísticas realizadas por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA), en este año 2018. Según sus datos, el principal factor que determina la compra e instalación de un sistema de producción de ACS o calefacción en una vivienda, con un 96%, es que éste sea capaz de aportar el confort requerido, seguido del ahorro (95%) y bajo mantenimiento (94%) **[9]**. Además, como se observa en las *Figuras 7 y 8*, casi la totalidad de los hogares tienen, al menos, un sistema de ACS, y a su vez, un alto porcentaje también disponen de otro equipo para suplir la demanda de calefacción **[9]**.

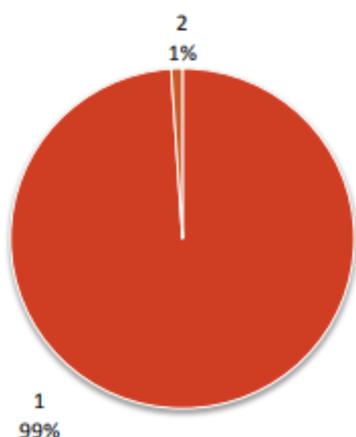


Figura 7. Equipos de ACS en el hogar [9].

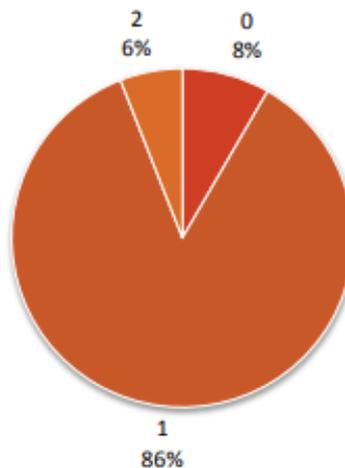


Figura 8. Equipos de calefacción en el hogar [9].

Observando estos datos de equipos instalados en los hogares, junto con los porcentajes que representan la percepción de los consumidores, podemos decir que **un sistema de bomba de calor podría cubrir todas las necesidades de los usuarios**, ya que con un solo equipo **se cubrirían ambas demandas**, con un sistema de alto rendimiento, confort y respetando las pautas fijadas por normativa, en fomento de las instalaciones ecológicas.

El principal inconveniente en este aspecto, reflejado de igual forma en los datos del IDEA, es el desconocimiento de esta tecnología. Sólo un 3% de los encuestados tiene conocimiento de las bombas de calor como sistema renovable, y menos del 1% incorporaría esta tecnología a su hogar [9]. Esto se debe principalmente a dos razones. Por un lado, la población percibe de forma generalizada que los sistemas basados en energías renovables tienen varias dificultades a la hora de su incorporación a la vivienda, necesidad de permisos externos, alta inversión inicial, necesidad de cambios estructurales, entre otros.

Como solución a esto, se debe de dar a conocer la competitividad real de las bombas de calor frente a los sistemas tradicionales, tanto en rendimiento, como en versatilidad de los equipos, además de fomentar este tipo de sistemas para los edificios de nueva construcción, ya que además de ser equipos muy eficientes, **no requieren de ninguna otra máquina auxiliar o de apoyo**, como sucede con las instalaciones de solar térmica.

¿Por qué el CO2 como refrigerante?

La razón que más favorece al uso del CO2 es su condición de refrigerante natural. Sus características de fluido no inflamable y baja toxicidad serían también dos importantes puntos a favor.

Respecto a sus cualidades termodinámicas, el CO₂ posee un factor de eficiencia de transferencia de calor muy elevado, que unido al carácter constante de su temperatura de evaporación, hace posible su uso con una menor diferencia de temperatura en evaporadores e intercambiadores de calor. El resultado es un consumo energético muy inferior [10]. Presenta altas presiones de servicio, y su **capacidad volumétrica es muy alta**, lo que favorece a la hora de necesitar un compresor más pequeño, al igual que el tamaño de las tuberías. Además, trabajando en transcrítico, podemos variar la presión de alta regulando la carga de refrigerante, sin necesidad de variar la temperatura de salida del enfriador de gas (*gas cooler* *).

El CO₂ es una **alternativa ideal para aplicaciones con altos saltos de temperatura**, como es el caso de la producción de ACS, dónde se eleva la temperatura del agua desde valores en torno a los 10°C hasta 60°C, e incluso hasta temperaturas superiores a los 80°C, en algunas aplicaciones industriales. Esto se debe a que **trabajando en transcrítico se necesita un menor consumo por parte del compresor para alcanzar altas temperaturas**. Además, con un ciclo de este tipo, la relación directa entre temperatura y presión, que existe en los ciclos subcríticos desaparece y esto permite controlar ambas variables de forma individual.

La mayor desventaja de este gas como refrigerante no viene definida por sus características como elemento, sino por las condiciones en las que debe trabajar para que el sistema sea eficiente. Debido a que los **sistemas transcríticos implican presiones de trabajo elevadas, los equipos que compongan el sistema de la bomba deben ser capaces de soportar dichas presiones** durante su vida útil.

No obstante, **la alternativa más directa a los refrigerantes convencionales no es el CO₂, sino el propano**. Éste gas, también se considera un refrigerante natural, que **trabaja en ciclos subcríticos**, por lo que la instalación de estos equipos tienen unos **costes similares a los de bombas de calor con refrigerantes convencionales**, mucho menor a los de CO₂, y el cual presenta valores de COP cercanos a los de bombas de CO₂. El mayor inconveniente es que es un gas inflamable, por lo que en determinados usos puede tener un alto riesgo.

** NOTA: En los ciclos transcríticos el gas refrigerante a su paso por el condensador no sufre cambio de fase, es decir, que a la salida del mismo sigue siendo un gas, pero a menor temperatura. Por este motivo se cambia la denominación de condensador a la de enfriador de gas (gas cooler), ya que simplemente reduce la temperatura del gas refrigerante y no produce cambio de fase.*

1.2. NORMATIVA.

La normativa aplicable al presente proyecto, es toda aquella relacionada con las instalaciones de producción de agua caliente sanitaria (ACS), las bombas de calor y los fluidos refrigerantes.

- **Código Técnico de la Edificación:**
 - HS4: Suministro de agua. Documento Básico de salubridad.
 - HE4: Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria. Documento Básico de ahorro de energía.
- **Directiva Europea 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009.** Mediante la Decisión del Consejo de 1 de marzo de 2013, establece unas directrices conforme a lo establecido en el anexo 5 de la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, para el cálculo de la energía renovable procedente de las bombas de calor.
- **UNE-EN 16147:2017.** Bombas de calor con compresor accionado eléctricamente. Ensayos y requisitos para el mercado de equipos para agua caliente sanitaria.
- **Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de octubre de 2009.** Instaura un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía.
- **Reglamento (UE) nº 814/2013 de la Comisión, de 2 de agosto de 2013.** Se aplica la Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, en lo relativo a los requisitos de diseño ecológico para calentadores de agua y depósitos de agua caliente.
- **Real Decreto 865/2003, de 4 de julio.** Establece los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis.
- **UNE 100030:2017.** Prevención y control de la proliferación y diseminación de Legionela en instalaciones.
- **Reglamento UE 517/2014 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de abril de 2014.** Estable normas y fija criterios sobre el uso y comercialización de los gases fluorados de efecto invernadero.

1.3. ÁMBITO DE APLICACIÓN.

1.3.1. Caso objeto del presente proyecto.

Como caso de estudio, en base al que se diseñará la bomba de calor, se ha tomado una **vivienda de cuatro personas, para el que se ha establecido una demanda tipo de 24 horas**. Es decir, el diseño de la bomba será para la producción de ACS de uso doméstico.

Por lo tanto, el sistema para la instalación de ACS en cuestión constará de:

- La bomba de calor.
- Depósito de acumulación del agua para el consumo, con temperatura constante de 60°C.
- Intercambiador de calor, para la recuperación de energía de las aguas grises.

Uno de los puntos destacables de la presente propuesta, es la incorporación al sistema de producción de ACS, la **recuperación de energía de las aguas residuales de las viviendas mediante un intercambiador de calor**. Las aguas grises, como se conocen a estas aguas residuales (no contienen residuos de origen humano, lo que serían aguas negras), son vertidas a la red de alcantarillado siendo en muy pocas ocasiones recicladas. En los casos en los que se reutilizan, se hace mediante su uso en inodoros, los que requieren una calidad de agua baja.

En este proyecto **se pretende reciclar éstas aguas, pero no en sí mismas, sino extrayendo la energía térmica que contienen**, ya que suelen tener una temperatura superior a la ambiental, debido a que provienen de baños y electrodomésticos como lavadoras, lavavajillas, etc. Se aprovecha toda la energía posible de las aguas grises y **se utiliza de forma que el agua de red (libre de contaminantes) llega al equipo encargado de calentarla, en este caso al gas cooler (condensador), a una temperatura más elevada**, lo que finalmente se traduce en un ahorro de energía en la producción de ACS. Sería una energía casi “gratuita”.

La ventaja principal de la propuesta es que no se produce un contacto directo entre fluidos, sino simplemente se aprovecha su elevada temperatura, y por tanto **no existe riesgo de contaminación** del agua de red que va a ser consumida.

El intercambiador de calor no será objeto de análisis en este proyecto, aunque si se tendrá en cuenta la aportación de dicha energía térmica, concretamente en la temperatura de entrada del agua de red al gas cooler de la bomba.

Para tener una visión más amplia sobre la utilización de las bombas de calor para producción de agua caliente sanitaria en el campo doméstico, **el sistema será comprobado tanto con la bomba de CO₂**, en la que se centra el presente trabajo, cuyo diseño del modelo será detallado en el documento de cálculos, **como con una bomba de propano**, la cuál ha sido diseñada por la cotutora de este proyecto. **Se obtendrán resultados de ambos sistemas, estudiados en las mismas condiciones.**

El modelo de la bomba, una vez diseñado, será escalado para este tipo de uso, al igual que el correspondiente depósito de acumulación. Dicho tanque, es otro de los elementos fundamentales de la propuesta del proyecto, ya que nos fija algunos aspectos que debemos cumplir y que nos acotan el comportamiento que debe tener la bomba dentro del sistema.

Se pretende tener un depósito con el agua en condiciones de consumo, y con una temperatura que evite la aparición de la legionela, por lo que se debe mantener a 60°. Será un depósito de temperatura constante, no estratificado. Esto implica una producción en la bomba a una temperatura ligeramente superior a dicha temperatura.

Con todo esto quedaría definido el caso de análisis. La elección del mismo se debe a que es un tipo de instalación común, de uso cotidiano. El estudio para una sola vivienda y la demanda diaria permite que la obtención de resultados sea sencilla, pero que aun así sirva como una base que puede ser extrapolada a una escala mayor.

1.4. DISEÑO DE LA BOMBA.

Para facilitar el seguimiento de los pasos que se han llevado a cabo para concluir con el diseño de la bomba, se presenta a continuación un diagrama a modo de esquema de los próximos puntos a tratar en el presente proyecto.

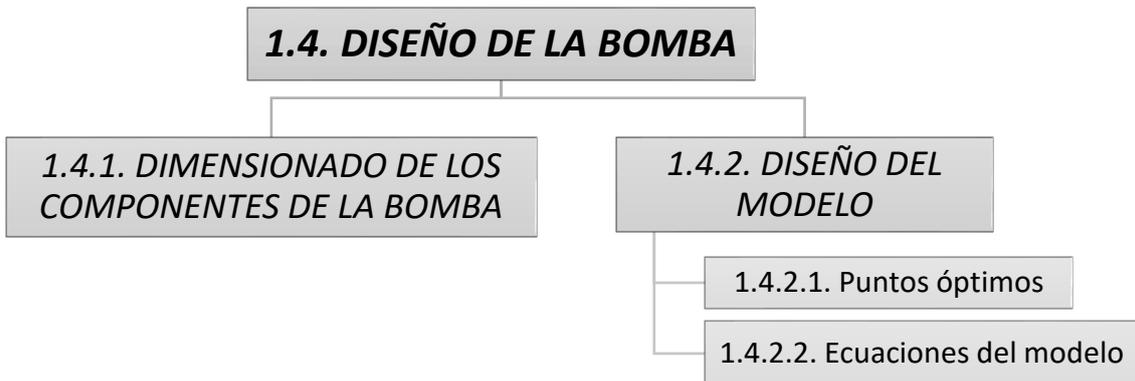


Figura 9. Esquema procedimientos: Diseño de la bomba.

1.4.1. DIMENSIONADO DE LOS COMPONENTES DE LA BOMBA DE CALOR.

Se ha realizado un dimensionado de los componentes principales de la bomba de calor: evaporador, enfriador de gas (gas cooler) y compresor. Para ello, se ha empleado el **software IMST-ART [11]**.

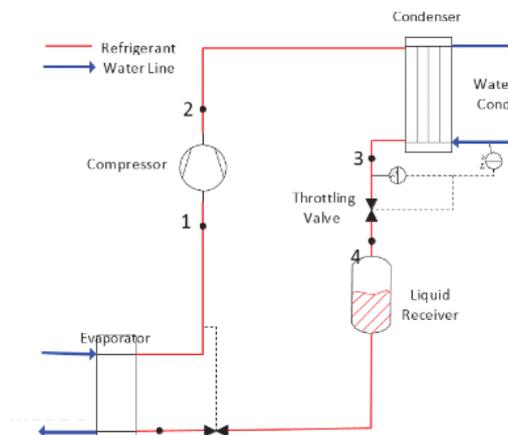


Figura 10. Esquema de los componentes que conforman la Bomba de Calor.

Para realizar esta primera parte del diseño del modelo, se han marcado ciertos **objetivos a lograr con el dimensionado de los componentes** de la bomba de calor:

- Tener una **aproximación de temperaturas de 5 K**. Esto quiere decir, que la diferencia de temperaturas, en ambos intercambiadores, entre la entrada del fluido secundario (agua) y la salida del refrigerante (CO₂), sea de 5 K, o lo más próximo a éste valor.
- Coefficient Of Performance (**COP**) **entre 3 – 5**.
- **Capacidad calorífica** en torno a los **48 kW**.
- **Capacidad volumétrica adecuada**. El compresor debe ser capaz de bombear la carga que requiere el sistema en cada momento, para así obtener los valores deseados de capacidad calorífica.
- **Caída de presión** en el condensador en torno a **24 – 25 kPa, sin superar los 30 kPa**.

1.4.2. DISEÑO DEL MODELO.

1.4.2.1. *Búsqueda de los puntos óptimos.*

Una vez establecidas las dimensiones de los componentes de la bomba, se establece un rango de puntos donde podría trabajar el sistema, es decir, diferentes combinaciones de temperaturas de entrada y salida del fluido secundario a la entrada y salida de los intercambiadores.

Para cada una de las condiciones, mediante un estudio paramétrico de carga de refrigerante en el sistema, se debe localizar el punto óptimo (máximo COP).

En un ciclo transcrito, si se supera la presión de descarga del compresor, se reduce la cantidad de calor que puede absorber el refrigerante, por lo que **para lograr el máximo rendimiento se debe buscar el equilibrio entre aporte de energía adicional en el compresor** (para proporcionar la presión de descarga más elevada), **y el efecto adicional de enfriamiento en el evaporador** (mayor absorción de energía), **que se produce por ese aumento de presión [12]**. Para lograr esa presión de descarga óptima que logra dicho equilibrio, se regula, para cada punto de trabajo de la bomba, **la carga de refrigerante (caudal) del sistema**.

Esta relación queda más claro viendo el ciclo sobre un diagrama de Mollier, y con la ecuación del COP.

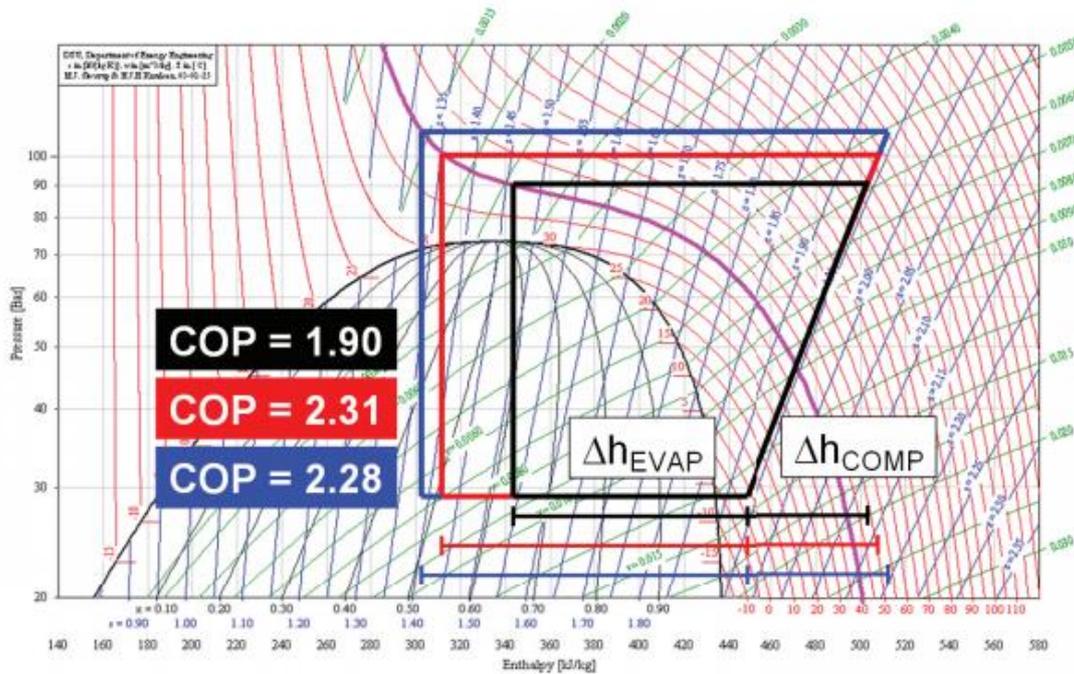


Figura 11. Ejemplos de cómo varía el COP según se modifique la presión de descarga del gas cooler. [12]

$$COP = \frac{Q_{heat}}{W_{comp.}} = \frac{Q_{cool} + W_{comp.}}{W_{comp.}}, \text{ siendo } Q_{cool} = m \cdot \Delta h_{evap}; W_{comp.} = m \cdot \Delta h_{comp.}$$

Si el aumento del trabajo del compresor (W) respecto al aumento de la capacidad de intercambio de energía (Q), o viceversa, es desproporcionado la bomba no estará trabajando todo lo bien que podría, por lo que es un punto a tener muy en cuenta a la hora de llevar a cabo el modelado.

Todos los puntos obtenidos en este apartado son los que permitirán obtener las correlaciones que finalmente definirán el modelo de la bomba.

1.4.2.2. Obtención de las ecuaciones del modelo.

Para poder definir el modelo de la bomba, necesitamos al menos conocer las expresiones del COP (en nuestro caso usaremos el COP heating, que hace referencia a la eficiencia de calentamiento), trabajo del compresor (Wc), y la potencia de los intercambiadores (Qcond. y Qevap.). Sin embargo, para lograr dichas expresiones necesitaremos correlacionar otras variables del sistema, como quedará detallado más adelante.

Todas las correlaciones son en función de las temperaturas de entrada y salida del evaporador, y de la temperatura de entrada al gas cooler, ya que la de salida será siempre la misma, en este caso 60°C.

Las expresiones de cada una de las correlaciones han sido complementadas con un gráfico comparativo entre los valores experimentales, obtenidos con el IMST-ART, frente a los valores obtenidos a partir de las correlaciones.

La **Ecuación (1)** refleja cómo queda definida la eficiencia de calentamiento de la bomba, con la siguiente expresión:

$$COP_{heating} = \left(\frac{Q_{cond}}{W_{compressor}} \right) \quad (1)$$

Donde Q_{cond} es la potencia calorífica de la bomba, y $W_{compressor}$ es el trabajo que realiza el compresor.

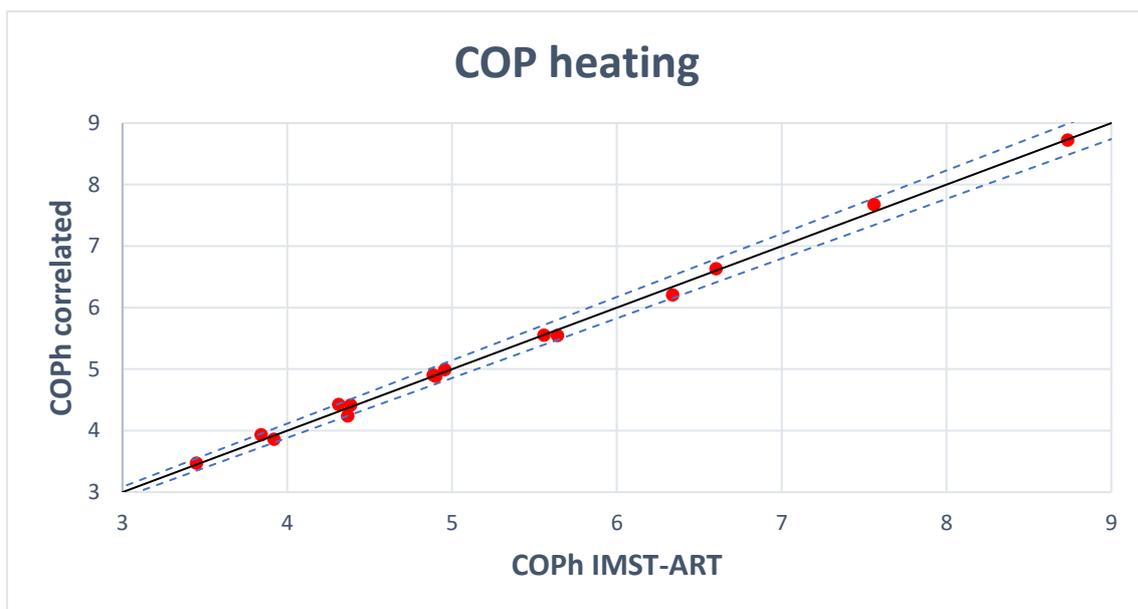


Figura 12. COPheating correlacionado y experimental.

La **Ecuación (2)** refleja la expresión del trabajo del compresor:

$$W_{compressor} = 113,48028 - 0,4026149 \cdot T_{o_{evap}} + 0,0025088 \cdot P_{disch} - 7,1329365 \cdot \left(\frac{P_{disch}}{P_{evap_{CO2}}} \right) \quad (2)$$

Donde $T_{o_{evap}}$ es la temperatura del agua a la salida del evaporador, P_{disch} es la presión de descarga del gas cooler, y $P_{evap.CO2}$ es la presión de evaporación del refrigerante, CO2.

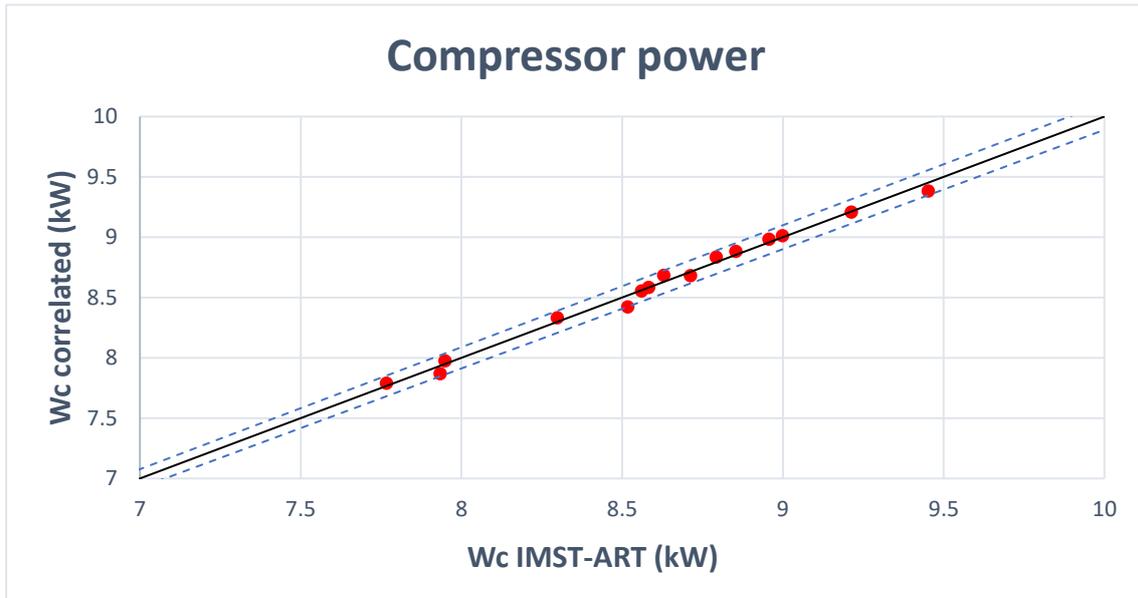


Figura 13. Trabajo del compresor experimental y correlacionado.

La energía que es capaz de extraer la bomba de calor del foco térmico en el evaporador, viene definido por la potencia frigorífica. Este valor depende de las temperaturas de entrada del agua en los intercambiadores, y del caudal de la misma que atraviesa el evaporador, cómo se observa en la **Ecuación (3)**:

$$Q_{evap} = 1,8746229 - 0,003286 \cdot T_{i_{evap}} - 0,0025118 \cdot T_{i_{cond}} + 20,831529 \cdot m_{w_{evap}} \quad (3)$$

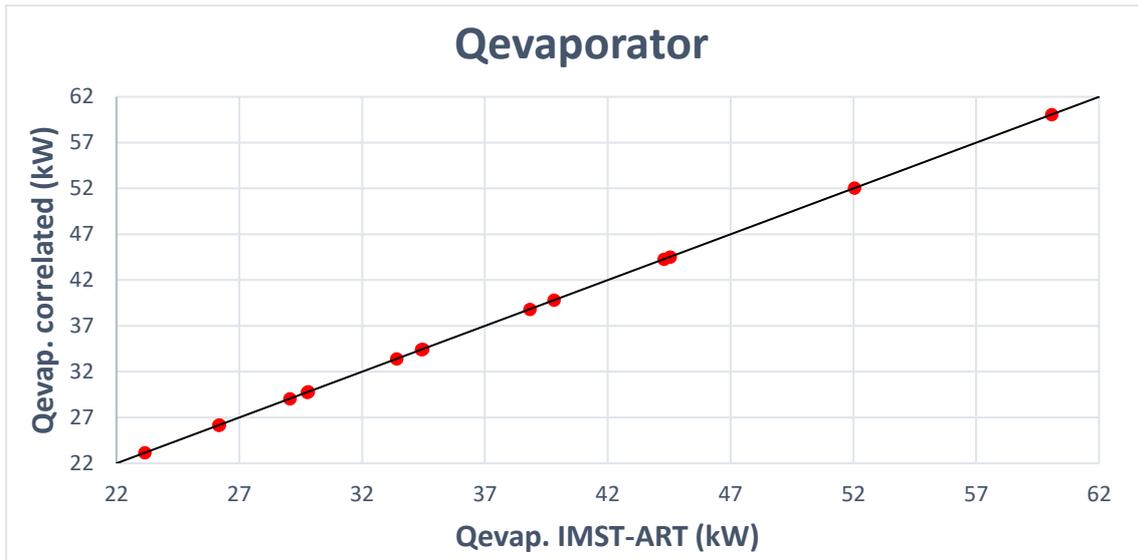


Figura 14. Potencia frigorífica experimental y correlacionada.

La energía extraída en el evaporador ahora es transmitida al agua, en el gas cooler. La potencia calorífica determina qué nivel de calentamiento puede transmitir nuestra bomba de calor. La Ecuación (4) define la expresión de esta variable:

$$Q_{cond} = -2367,834 + 8,7938537 \cdot Ti_{evap} + 6,8602246 \cdot Ti_{cond} - 0,0257345 \cdot (Ti_{cond} \cdot To_{evap}) \quad (4)$$

Donde Ti_{evap} es la temperatura de entrada del agua al evaporador, To_{evap} la temperatura a su salida, y Ti_{cond} la temperatura del agua al entrar al gas cooler.

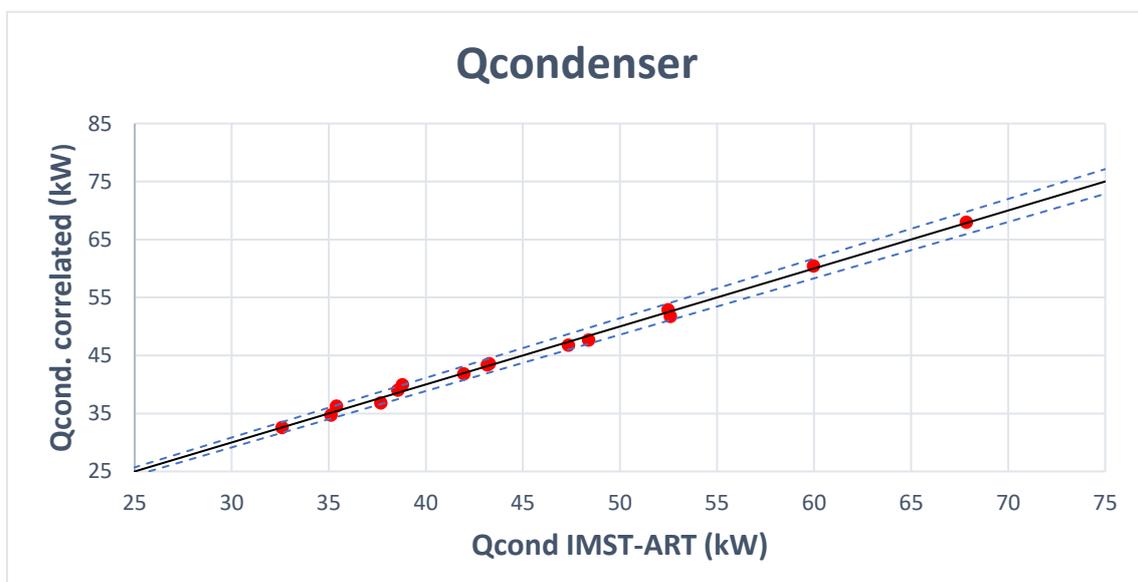


Figura 15. Potencia calorífica experimental y correlacionada.

Otro parámetro que se ha tenido que correlacionar para definir el modelo, ha sido el temperature approach en el gas cooler, cómo vemos en la **Ecuación (5)**:

$$T_{approach} = T_{o_{cond}CO2} - T_{i_{cond}} \quad (5)$$

Donde $T_{o_{cond}CO2}$ es la temperatura del refrigerante a la salida del gas cooler, una vez ha transmitido el calor al agua de red, y $T_{i_{cond}}$ es la temperatura de dicho agua a la entrada del gas cooler, antes de alcanzar los 60°C fijado para su salida.

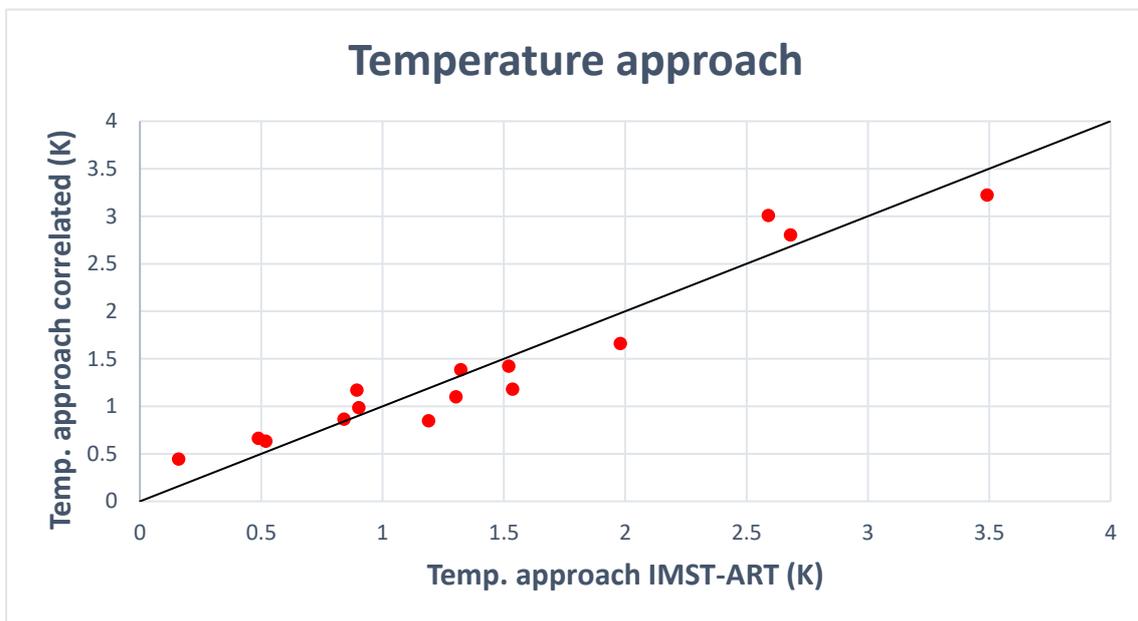


Figura 16. Temperature approach experimental y correlacionado.

La **Ecuación (6)** define el valor de la temperatura del refrigerante a la salida del gas cooler, y la relación de esta variable con las temperaturas de entrada del agua ($T_{i_{cond}}$) y el caudal de la misma (mw_{cond}), en el gas cooler.

$$T_{o_{cond}} = 31,14539246 + 0,894858081 \cdot T_{i_{cond}} + 5,696235118 \cdot mw_{cond} \quad (6)$$

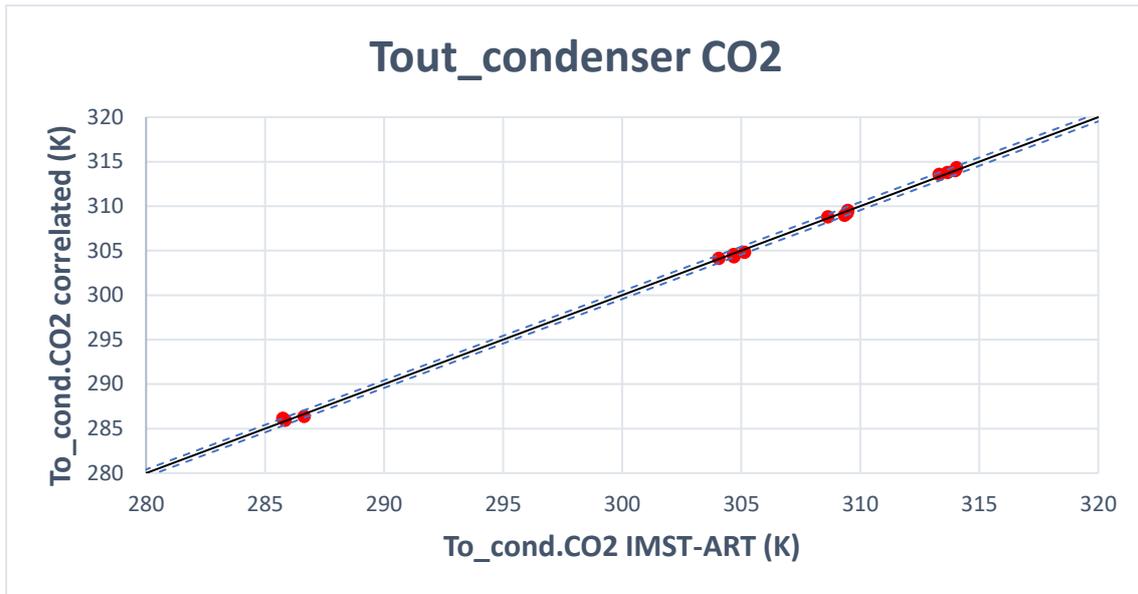


Figura 17. Temperatura del CO2 a la salida del gas cooler, experimental y correlacionada.

Una de las variables más determinantes del sistema del presente proyecto, debido a que el CO2 trabaja en transcrito, es la presión de descarga del refrigerante a la salida del gas cooler. La **Ecuación (7)** refleja su expresión matemática:

$$\begin{aligned}
 P_{discharge} = & -69814.6947 + 561,7503879 \cdot (\text{Press. rat.} \cdot T_{\text{approach}}) + \\
 & 64,58523503 \cdot (\text{Disch. temp.} \cdot \text{Press. rat.}) + 297,997428 \cdot \\
 & \text{Disch. temp.} - 34909.5156 \cdot \text{Press. rat.} - 857,005885 \cdot T_{\text{approach}} \quad (7)
 \end{aligned}$$

Vemos la dependencia que tiene la presión de descarga con respecto a otros parámetros del sistema, como son la relación de presiones del condensador (*Press.rat.*), el temperature approach (*T_{approach}*), y la temperatura del refrigerante a la salida del compresor (*Disch.temp.*).

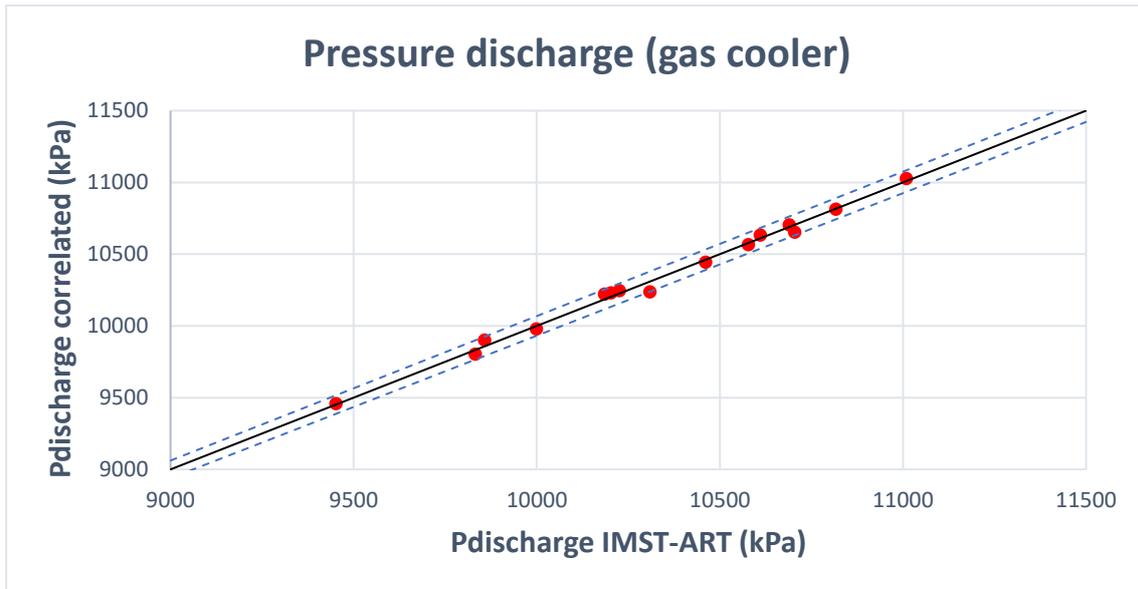


Figura 18. Presión de descarga experimental y correlacionada.

La **Ecuación (8)** determina la expresión matemática de la relación de presiones en el compresor, necesaria para obtener la expresión anterior de la presión de descarga en el gas cooler, **Ecuación (7)**.

$$\begin{aligned}
 \text{Pressure rat.} = & 6,221498856 - 0,00050147 \cdot (T_{o_{\text{evap}}} \cdot T_{i_{\text{cond}}}) + 0,000194436 \cdot \\
 & (T_{o_{\text{evap}}})^2 + 0,000255408 \cdot (T_{i_{\text{cond}}})^2 \quad (8)
 \end{aligned}$$

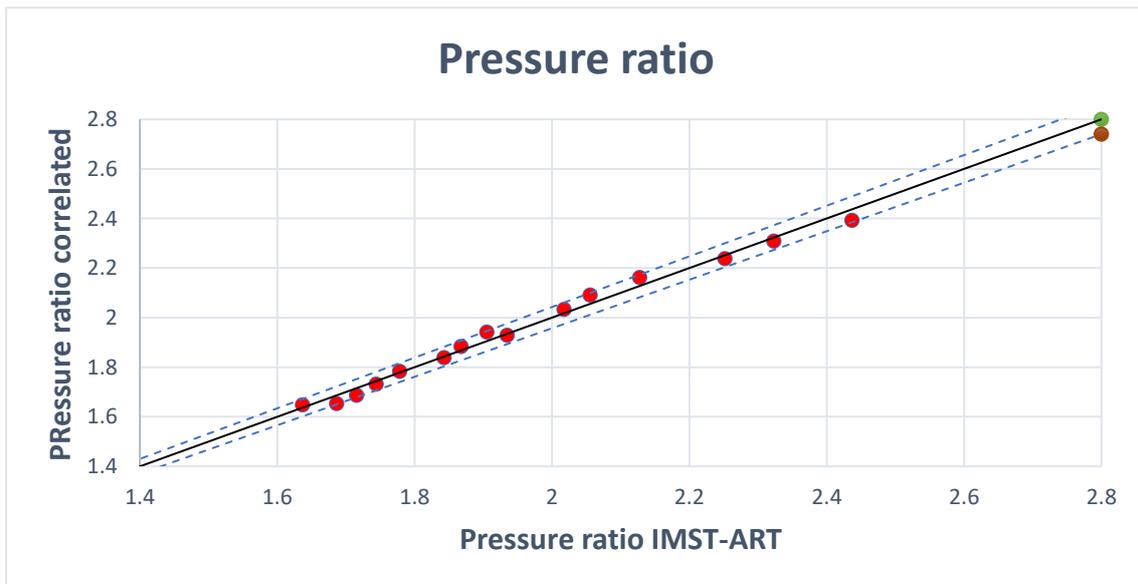


Figura 19. Relación de presiones experimental y correlacionada.

La **Ecuación (9)** de la temperatura de descarga del refrigerante en el compresor, es igualmente necesaria para obtener la **Ecuación (7)**.

$$\text{Disch. temp.} = 518,2319078 + 0,009071633 \cdot (T_{i_{\text{cond}}} - T_{o_{\text{evap}}})^2 - 0,75649781 \cdot T_{o_{\text{evap}}} + 0,158748895 \cdot T_{i_{\text{cond}}} \quad (9)$$

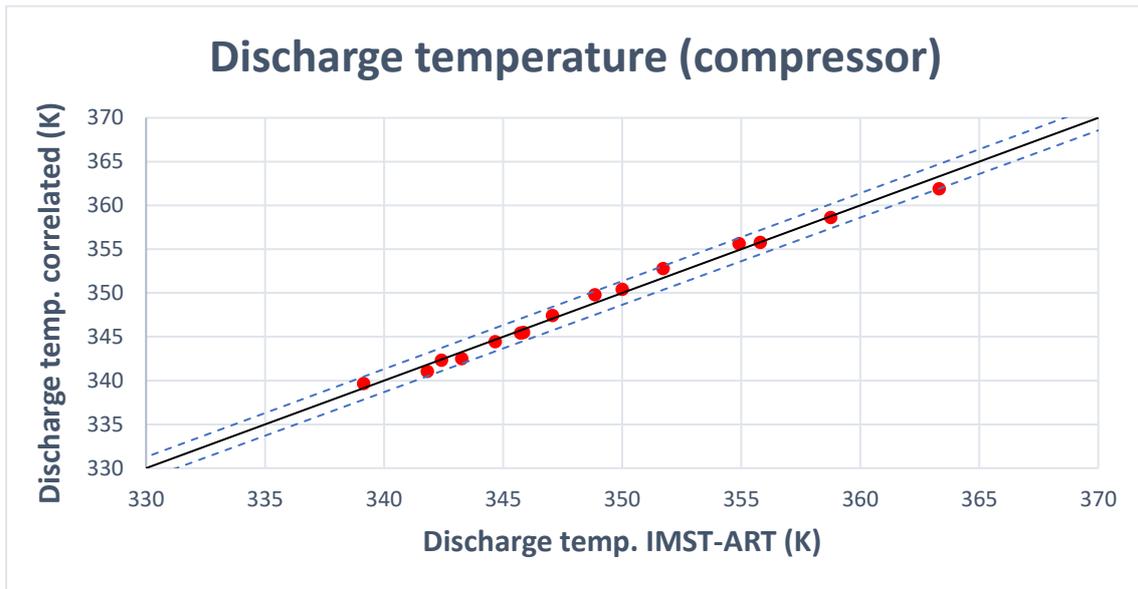


Figura 20. Temperatura del CO2 a la salida del compresor experimental y correlacionada.

Con todas estas ecuaciones queda definido el modelo de la bomba, lo que hace que ésta pueda ser introducida en un sistema de producción de ACS, y ver su comportamiento dentro de la instalación global, es decir, evaluar la solución que se ha obtenido frente a una demanda, teniendo en cuenta los demás componentes secundarios que intervienen en un sistema real de producción de ACS.

1.5. COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA DENTRO DEL SISTEMA DE ACS.

Al igual que se ha hecho en el apartado anterior, como guía visual de este apartado, se ha realizado un esquema, con los puntos que van a ser tratados en el siguiente apartado.

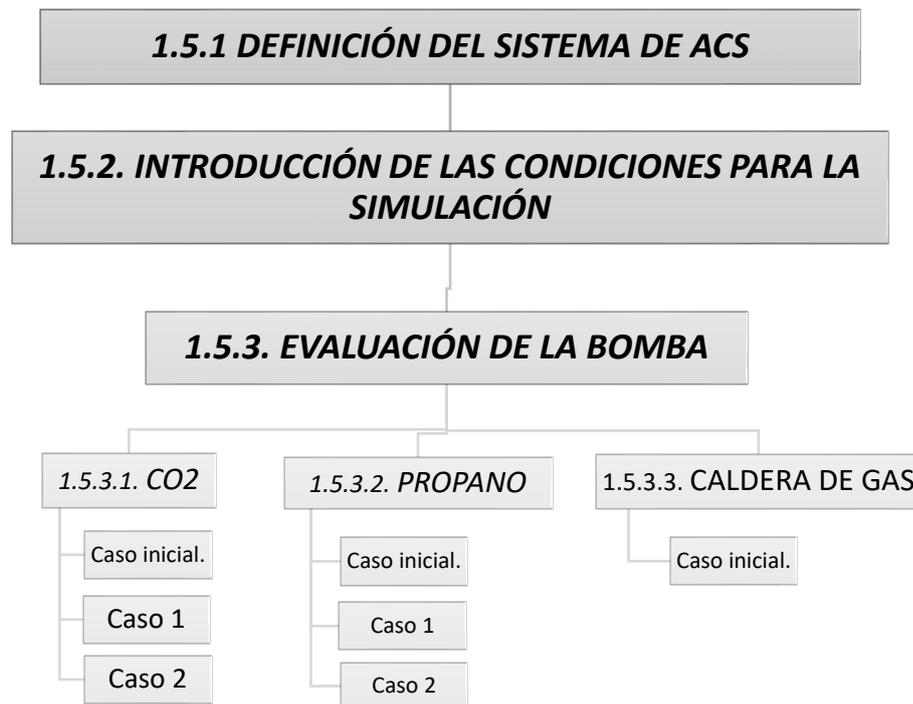


Figura 21. Esquema apartado: Evaluación de la bomba.

1.5.1. DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE ACS.

Para poder evaluar la bomba en el sistema global de ACS, primero dicho sistema debe ser definido. El software Trnsys [13] permite simular este tipo de sistemas a partir de la definición de los modelos o types que lo van a conformar. Por tanto, para el presente proyecto, se deben detallar los siguientes types:

- Bomba de calor.
- Tanque de acumulación.
- Intercambiador para la recuperación de calor.
- Elementos auxiliares que conforman el sistema: bombas, tuberías y controladores.

Tanto el tanque de acumulación como el intercambiador de calor para la recuperación de energía, y el resto de componentes auxiliares se obtienen de los modelos de la biblioteca de Trnsys. **En cuanto a la bomba, el modelo es introducido directamente a partir de las ecuaciones obtenidas anteriormente**, ya que ha sido diseñado y optimizado desde cero, **por lo que es único**.

El conjunto de todos estos componentes conforma el sistema de ACS donde se simulará el comportamiento de la bomba de calor. Dicho sistema ha sido elaborado por la cotutora de este proyecto, D^a Estefanía Hervás Blasco, miembro del Instituto de Ingeniería Energética de la UPV, **y partir de su diseño se han realizado las modificaciones necesarias** para el desarrollo de este trabajo.

1.5.2. INTRODUCCIÓN DE LAS CONDICIONES PARA LA SIMULACIÓN.

Una vez definida la instalación de ACS, procederemos a buscar las dimensiones de la bomba de calor y del depósito de acumulación que hacen que las condiciones de consumo se cumplen, es decir, que en todo momento los consumidores reciben el agua a la temperatura adecuada. Para ello establecemos como condición indispensable, que **la temperatura del depósito se mantenga siempre igual o superior a los 60°C**. Para cumplir con este último requisito, se debe tener en cuenta la pérdida de temperatura que sufre el agua durante el tiempo que permanece en el depósito sin ser consumida, por lo que se buscará cuánto mayor debe ser la temperatura de producción de agua caliente de la bomba respecto a los 60°C queremos mantener en la acumulación. **Es decir, se trabajarán con tres parámetros: temperatura de producción, volumen del depósito y tamaño de la bomba.**

NOTA: El Scale de la bomba, representa la escala de la bomba respecto al tamaño original que se obtuvo en la primera parte del proyecto, con el dimensionado de los componentes para obtener una potencia de 48 kW.

Una de las modificaciones efectuadas sobre el sistema inicial de ACS ha sido la introducción de un controlador del tiempo de funcionamiento de la bomba. Por tanto, **se ha establecido la distinción tarifaria como estrategia de control**. Se acota el tiempo que la bomba está en marcha, dejando prefijada esta condición de trabajo.

Para ello se han planteado tres casos basados en las principales opciones en cuanto a tarifas eléctricas existentes en el mercado:

- **Caso inicial.** La bomba trabaja las 24 horas del día. *Será el caso de referencia (ideal).*
- **Caso 1.** La bomba trabaja 14 horas, las cuales se concentran mayormente en las horas nocturnas, concretamente en el periodo de 22:00 a 12:00 horas.
- **Caso 2.** La bomba trabaja 12 horas, pero de forma repartida durante el día. Se fijan tres periodos: 00:00 a 04:00 horas, 08:00 a 12:00 horas, y de 16:00 a 20:00 horas.

Con este enfoque se pretende tener en cuenta posibles alternativas a la hora de poner en marcha la instalación en un caso real, y observar que dimensiones de bomba y tanque son las necesarias según los periodos de funcionamiento de la bomba, para así poder valorar qué situación es la más óptima en cuanto a rendimiento frente al coste de operación, es decir, respecto a la energía consumida por la instalación para abastecer la demanda, sin tener en cuenta la inversión inicial.

Una vez obtenidos los resultados para cada uno de los casos con la bomba de CO₂, **se procederá a realizar la misma operación con un modelo de bomba de propano**, trabajando en las mismas condiciones, **y finalmente se estudiarán los mismos casos pero con una caldera convencional de gas**, con rendimiento del 97%. **Con los resultados de las tres máquinas, se procederá a realizar una comparativa y una valoración de la mejor opción**, según rendimientos y consumos para la misma demanda.

El modelo de la bomba de propano que se empleará para la comparativa, ha sido diseñado por la cotutora de este proyecto: D^ª Estefanía Hervás Blasco, miembro del Instituto de Ingeniería Energética de la UPV. Este diseño está enmarcado dentro del Proyecto europeo "Next Generation of Heat Pumps working with Natural fluids" (in short NxtHPG). Algunos de los objetivos de este proyecto son:

- Desarrollo de bombas de calor, que trabajen con refrigerantes naturales, que pueda derivar en una rápida comercialización.
- Desarrollo de bombas de calor de aire, o agua-agua que trabajen con Hidrocarburos (HC), para agua caliente (40 – 50 °C) para calefacción, y para agua caliente sanitaria (ACS), a 60°C.
- Desarrollo de bombas de calor de alta capacidad para producir agua caliente sanitaria a 60°C directamente a partir del agua de red (10 – 15 °C).
- En definitiva se pretende alcanzar una mayor eficiencia, y reducir la huella de carbono, respecto a las tecnologías actuales que trabajan con gases fluorados (HFC, HFO).

1.5.3. EVALUACIÓN DE LA BOMBA.

1.5.3.1. Casos de estudio. Bomba de CO2.

Como se ha comentado anteriormente, se han analizado tres casos, según las horas de funcionamiento de la bomba de calor. Para cada caso, se han obtenido las dimensiones de la bomba, mediante el valor de la escala de la bomba (Scale HP), y del depósito, definido por el volumen del mismo, además de la temperatura de producción del agua caliente por parte de la bomba.

Para asegurar que el comportamiento de la bomba es correcto, y que cada día funciona de igual manera, se han realizado las simulaciones para un periodo de cinco días, a pesar de que la demanda a la que hace referencia en el presente proyecto es de 24 horas. Por lo que las gráficas resultantes deben mostrar patrones repetitivos.

1.5.3.1.1. Caso inicial. CO2.

Este primer caso será el que nos sirva de referencia para la comparación de las otras dos alternativas con distinción tarifaria. Los resultados obtenidos en este apartado nos determinarán el **COP de referencia de la bomba de calor**, que será el máximo que se podría lograr para suplir la demanda asignada, y el mínimo consumo de energía asociado.

En este escenario, la bomba trabaja las 24 horas del día. También se establece que la temperatura de **producción de agua caliente sea a 60°C**, que es la que se quiere mantener en el tanque de acumulación para el consumo. **Además, al ser un supuesto idealizado, se supone un aislamiento perfecto en el depósito**, es decir, que el agua producida a 60°C no perderá temperatura en su estancia en el tanque hasta ser consumida.

Los valores obtenidos, que permiten abastecer la demanda, son los siguientes:

<i>Valores del sistema</i>	
<i>Scale HP</i>	0.003636
<i>Volumen</i>	0.045 m ³
<i>COP</i>	9.68
<i>Consumo diario</i>	0.659 kWh
<i>Consumo anual</i>	240.5 kWh

Tabla 2. Resultados CASO INICIAL_CO2 (referencia).

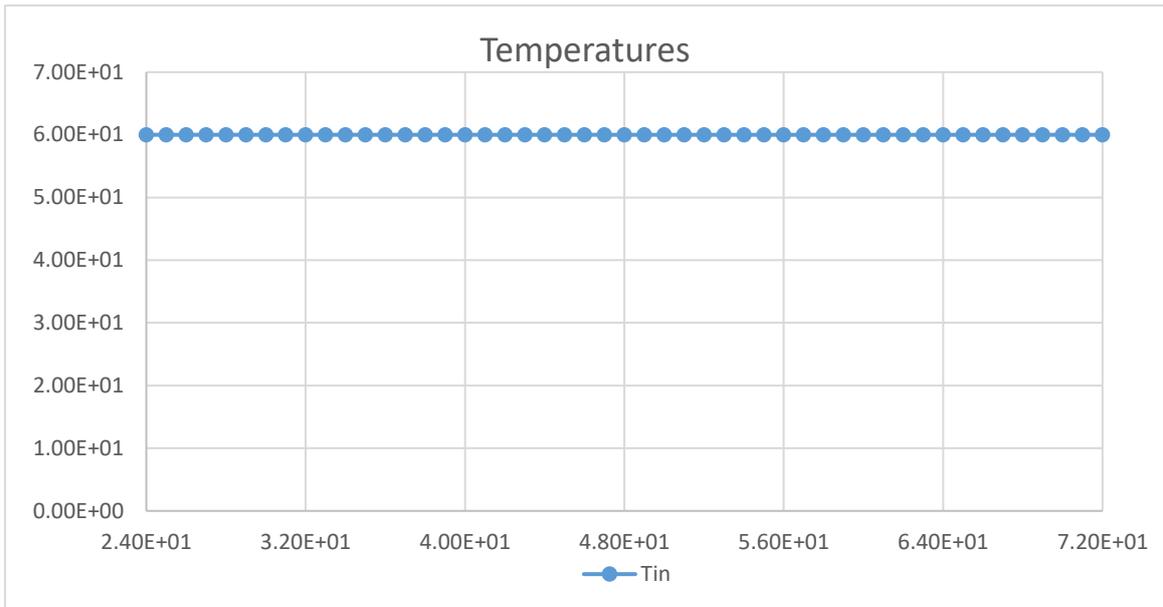


Figura 22. Temperatura de entrada al depósito. Caso inicial_CO2. Periodo de 2 días.

En la *Figura 22* se puede observar como se comporta la temperatura, una vez pasado el periodo de estabilización de la misma. En este caso la temperatura de entrada y la del depósito coinciden, ya que se ha supuesto un aislamiento perfecto.

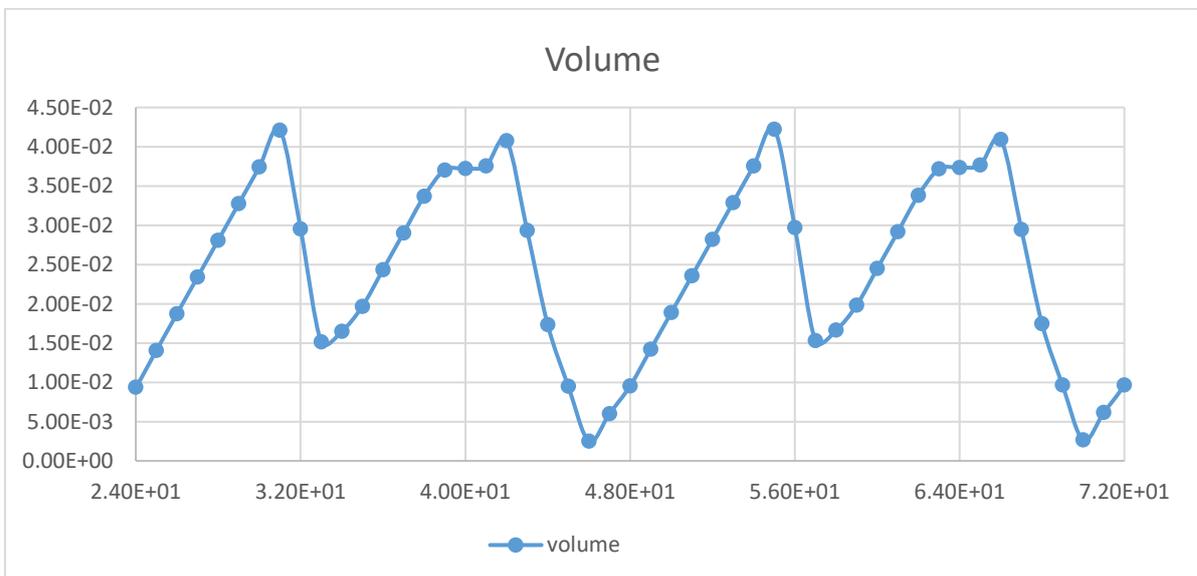


Figura 23. Variación del volumen del depósito. Caso inicial_CO2. Periodo de 2 días.

Cómo se observa claramente en la *Figura 23*, la variación del volumen del depósito es cíclica, cada día el volumen de agua dentro del tanque sufre las mismas fluctuaciones. El volumen de agua caliente se mantiene siempre por debajo de la máxima capacidad del depósito, por lo que no aparecerán excesos que puedan provocar un desborde. Tampoco aparecen puntos de vaciado del mismo.

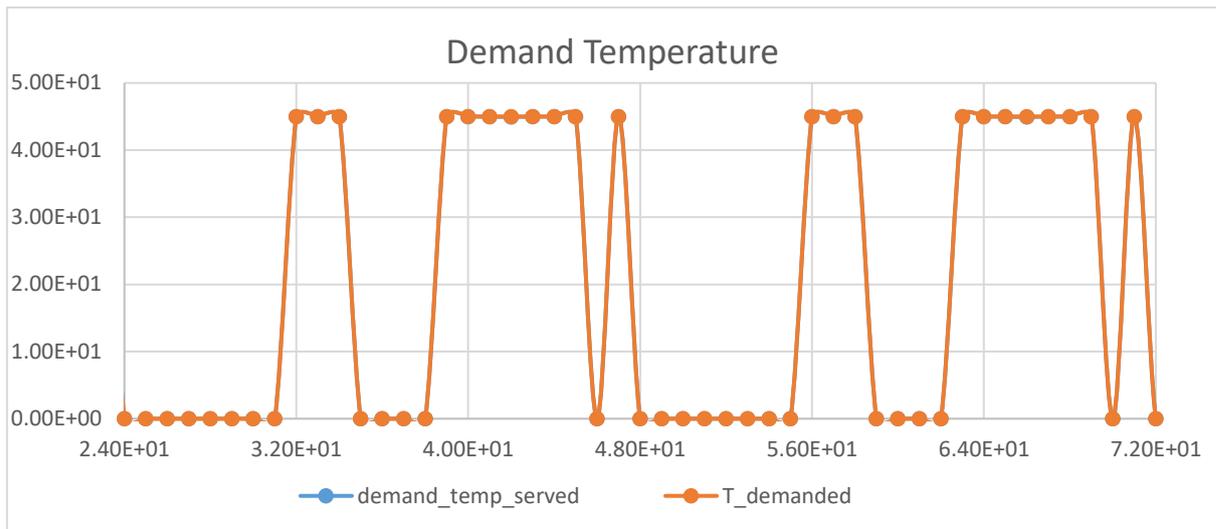


Figura 24. Temperatura demandada y Temperatura servida. Caso inicial_CO2. Periodo de 2 días.

Con el tamaño de bomba y de depósito obtenidos, se ha logrado abastecer la demanda, como se puede ver en la Figura 24.

1.5.3.1.2. Caso 1. CO2.

Para este caso aplicamos una **tarifa de periodo nocturno, donde la bomba trabajará un total de 14 horas**. Aquí se ha buscado encuadrar el funcionamiento del sistema al periodo de horas valle, establecido por las compañías eléctricas como la franja entre las 22:00 y las 12:00 horas, para los meses de invierno, y se trasladaría una hora en los meses de verano (de 23:00 a 13:00 horas).

A diferencia del caso inicial, **ahora el depósito no posee un aislamiento ideal**, por lo que el agua caliente sufrirá pérdidas.

Los resultados obtenidos que hacen que se cumpla la demanda, son los siguientes:

<i>Valores del sistema</i>	
<i>Temp. Producción ACS</i>	72 °C
<i>Scale HP</i>	0.00696
<i>Volumen</i>	0.065 m ³
<i>COP</i>	8.93
<i>Consumo diario</i>	0.765 kWh
<i>Consumo anual</i>	279.2 kWh

Tabla 3. Resultados CASO 1_CO2. 14 horas.

Con los valores de la Tabla 3, queda claro que al reducir el tiempo de producción a un único periodo se requiere que la bomba sea más grande, y por consiguiente el tamaño del depósito,

que tendrá que acumular el agua que se va a consumir las horas restantes del día. También destaca un ligero aumento del consumo, y un pequeño descenso en el valor del COP.

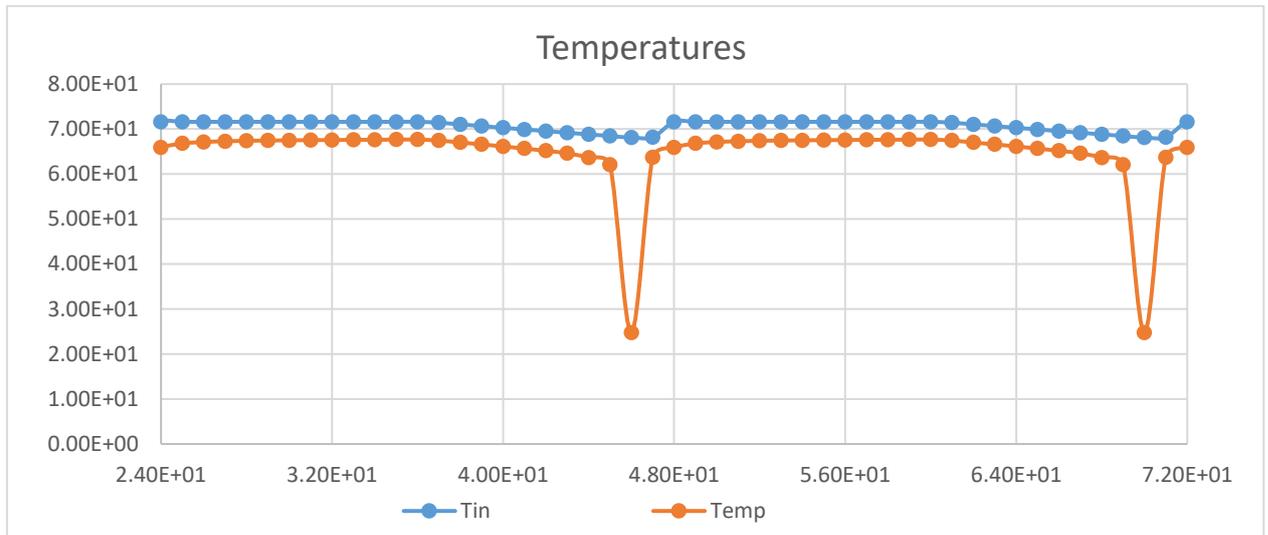


Figura 25. Temperatura de entrada al depósito y Temperatura del depósito. Caso 1_CO2. Periodo de 2 días.

Debido a que la bomba sólo trabaja las primeras 14 horas al día, el agua debe producirse a una temperatura bastante más alta, para que el depósito siempre tenga agua a un mínimo de 60°C. Como se aprecia en la *Figura 25*, la temperatura en el depósito es casi constante, produciéndose picos de caída de la misma en el punto donde tiene lugar el último consumo elevado del día, lo que provoca que se vacíe el tanque y de ahí el descenso brusco de la temperatura en el interior.

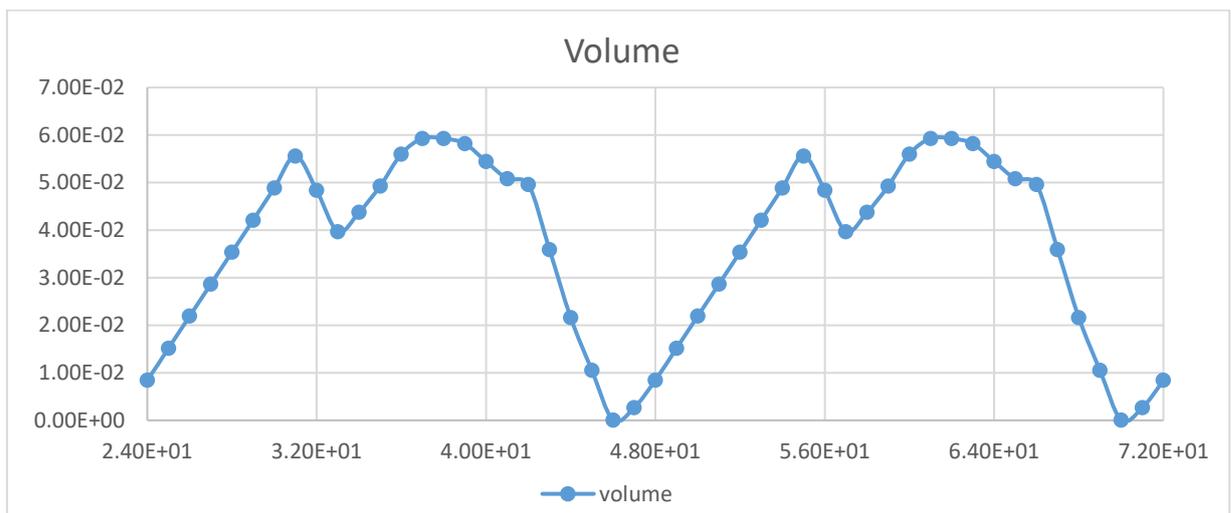


Figura 26. Variación del volumen del depósito. Caso 1_CO2. Periodo de 2 días.

Como se intuía de lo visto en la *Figura 25*, sobre el vaciado del depósito casi al final del día, se ve corroborado con la *Figura 26*, donde se observa que el volumen del depósito se hace cero justo antes de que la bomba vuelva a ponerse en marcha.

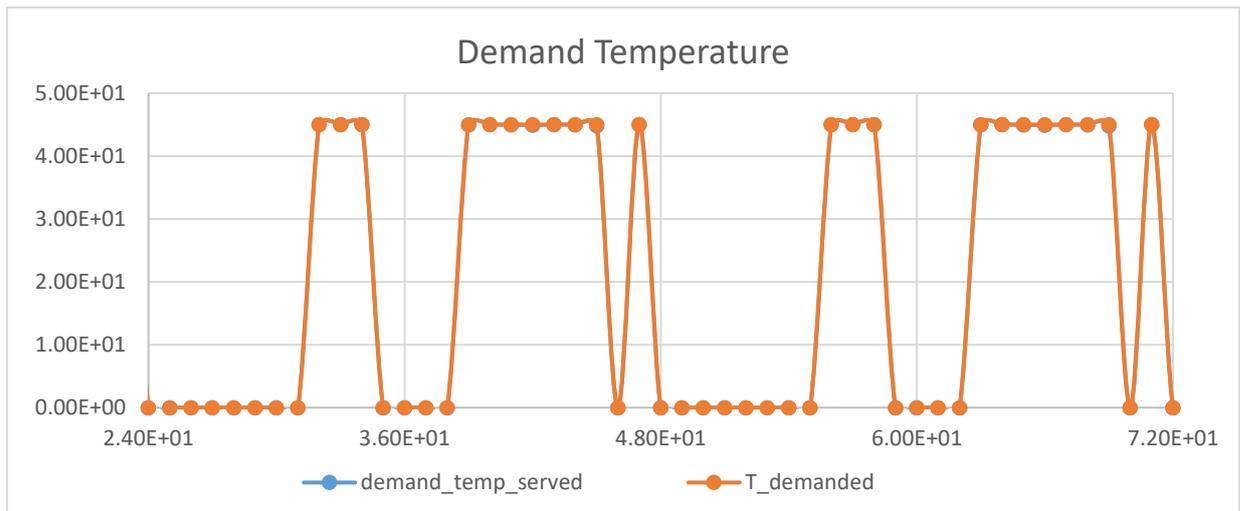


Figura 27. Temperatura demandada y Temperatura servida. Caso 1_CO2. Periodo de 3 días.

La Figura 27 muestra los resultados de las temperaturas demandada y servida por la bomba de calor. Ambas coinciden por lo que no existen puntos de no abastecimiento para este caso de tarifa de 14 horas diarias de funcionamiento.

1.5.3.1.3. Caso 2. CO2.

Por último planteamos una **distinción tarifaria de tres periodos**, una de distribuir de forma más homogénea las horas de trabajo de la bomba. Los horarios con el sistema produciendo agua caliente son los siguientes: de 00:00 a 04:00 horas, de 08:00 a 12:00 y de 16:00 a 20:00 horas, lo que suma **un total de 12 horas**.

El objetivo es averiguar cómo afecta esta distribución, más repartida en el día, en cuanto al rendimiento del sistema, consumos y temperaturas resultantes. Los resultados obtenidos que hacen que se cumpla la demanda, son los siguientes:

Valores del sistema	
Temp. Producción ACS	67 °C
Scale HP	0.00762
Volumen	0.04 m ³
COP	9.01
Consumo diario	0.719 kWh
Consumo anual	262.4 kWh

Tabla 4. Resultados CASO 2_CO2. 12 horas.

Al igual que para el caso 1, la Tabla 4 muestra que, debido a las pérdidas, es necesario producir agua a mayor temperatura, lo que implica una bomba de mayor tamaño y un depósito de un volumen también mayor. Sin embargo, para este caso esas dimensiones afectan en menor

medida al rendimiento del sistema, y eso queda reflejado en **un COP más cercano al del caso inicial**.

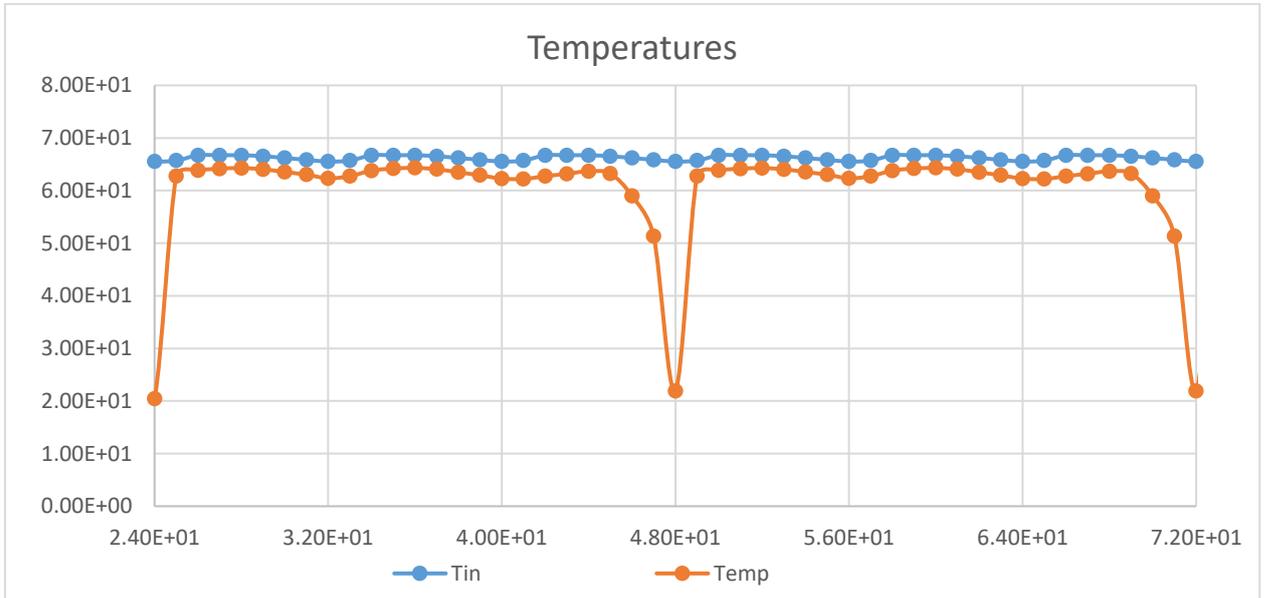


Figura 28. Temperatura de entrada al depósito y Temperatura del depósito. Caso 2_CO2. Periodo de 2 días.

El comportamiento de la temperatura del depósito del caso 2, mostrado en la *Figura 28*, se asemeja mucho al del caso anterior, manteniéndose casi constante durante todo el día hasta que los consumos de las horas finales, momento en el que la bomba se encuentra parada, hacen que la temperatura caiga debido a que provocan el vaciado del tanque de acumulación.

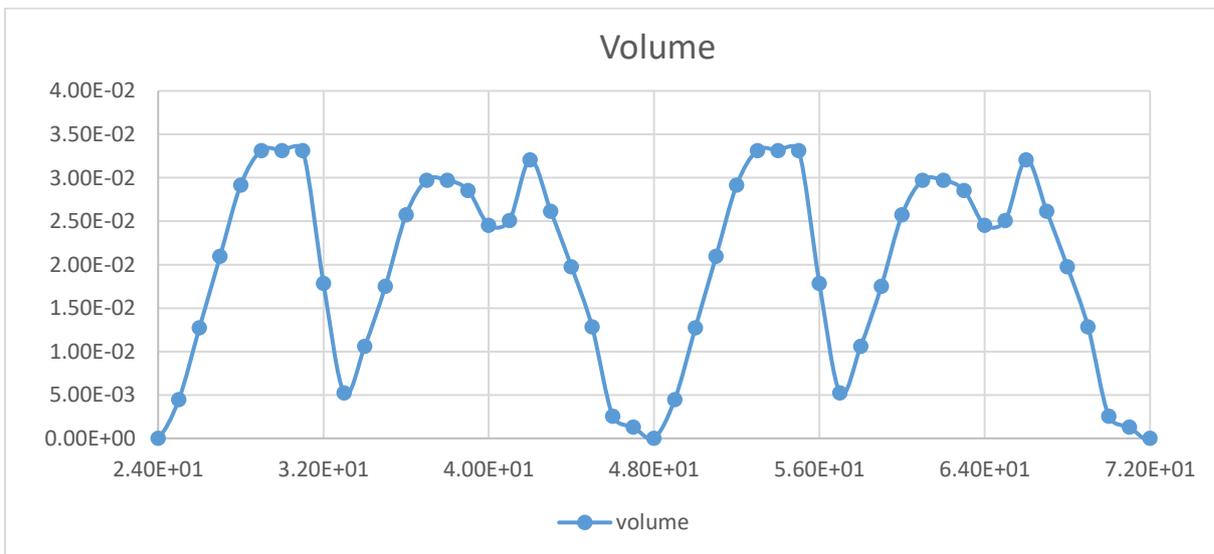


Figura 29. Variación del volumen del depósito. Caso 2_CO2. Periodo de 2 días.

Se puede ver, *Figura 29*, que tienen lugar varias fluctuaciones en el volumen del depósito, esto se debe a coinciden momentos de consumo elevado con paradas de la bomba. Además cuando

se está produciendo agua caliente también se está consumiendo, por lo que nunca se alcanza el volumen máximo del depósito.

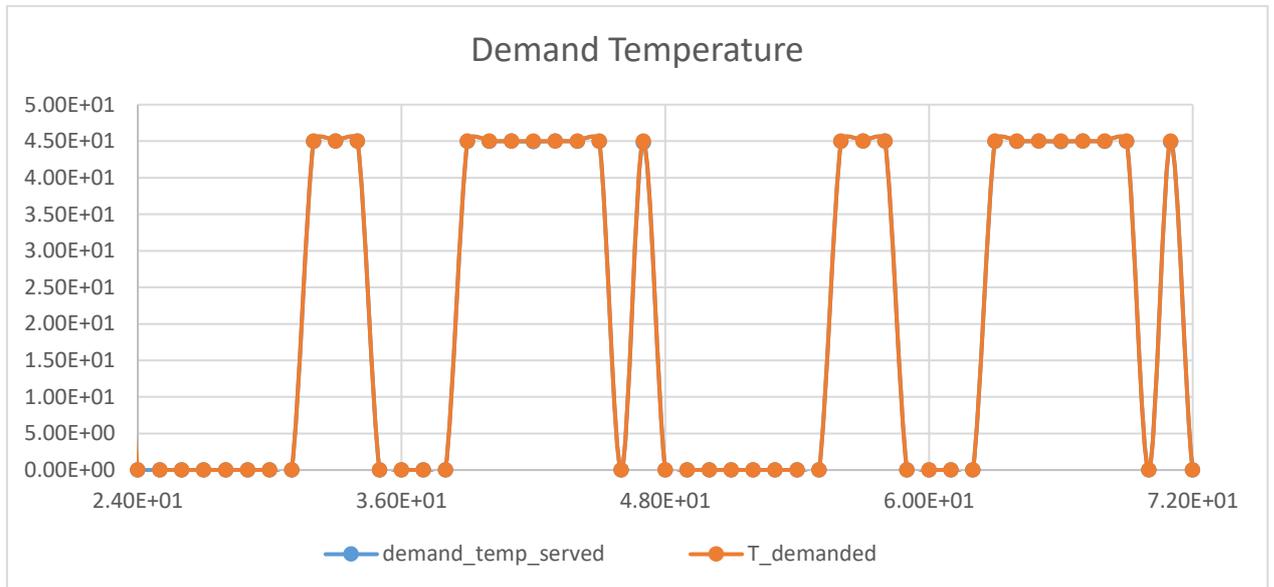


Figura 30. Temperatura demandada y Temperatura servida. Caso 2_CO2. Periodo de 2 días.

Con el nuevo reparto de horas de trabajo de la bomba, la demanda también queda satisfecha, *Figura 30.*

1.5.3.2. Casos de estudio. Bomba de Propano.

A continuación se reflejarán los resultados obtenidos para las condiciones establecidas en los casos anteriores, pero **cambiando la bomba de CO2 por una de características similares, cuyo fluido refrigerante es el propano.**

1.5.3.2.1. Caso inicial. Propano.

Como sucedía con la bomba de CO2, **este caso inicial será el que fije la referencia en cuanto a los valores de COP y energía consumida más óptimas,** que se podrían lograr con la bomba de propano para satisfacer la demanda.

De igual forma que en el procedimiento anterior, **se considera un aislamiento perfecto en el depósito de acumulación,** y que por tanto **el agua caliente no sufre pérdidas de temperatura** desde su salida del gas cooler hasta que le llega al consumidor, después de su paso por el tanque.

Los resultados obtenidos, son los siguientes:

<i>Valores del sistema</i>	
<i>Temp. Producción ACS</i>	60 °C
<i>Scale HP</i>	0.00345
<i>Volumen</i>	0.045 m ³
COP	8.15
<i>Consumo diario</i>	0.798 kWh
<i>Consumo anual</i>	291.3 kWh

Tabla 5. Resultados CASO INICIAL_Propano.

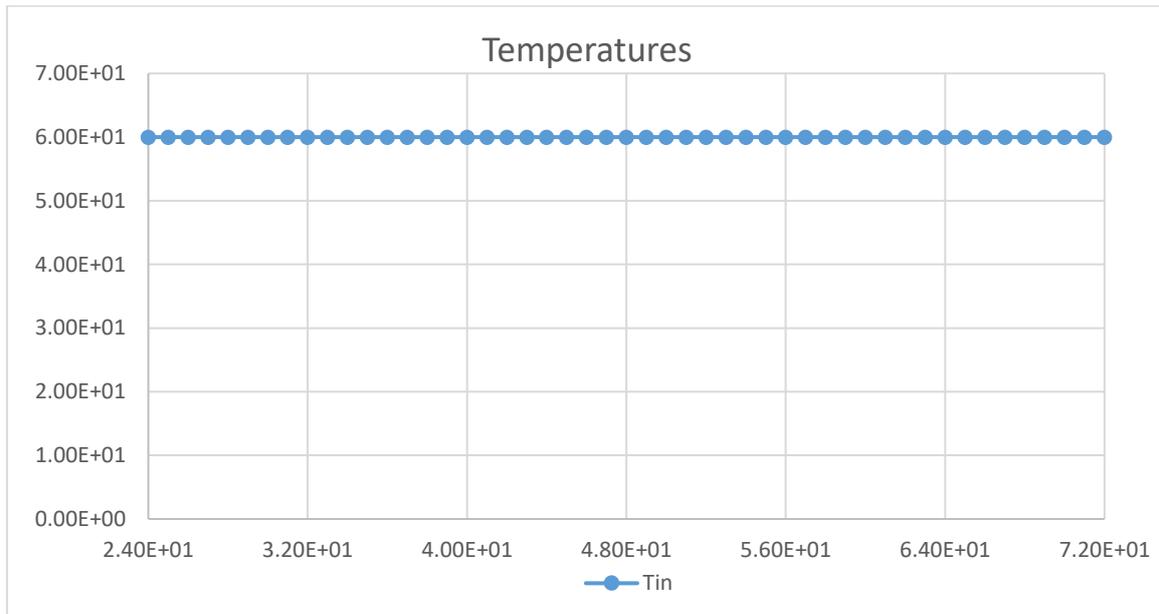


Figura 31. Temperatura de entrada al depósito. Caso inicial_Propano. Periodo de 2 días.

La *Figura 31* muestra cómo la temperatura se mantiene constante desde su salida de la bomba de calor hasta su entrada en el depósito. Esta será la temperatura del agua en el depósito, ya que estamos ante un caso ideal.

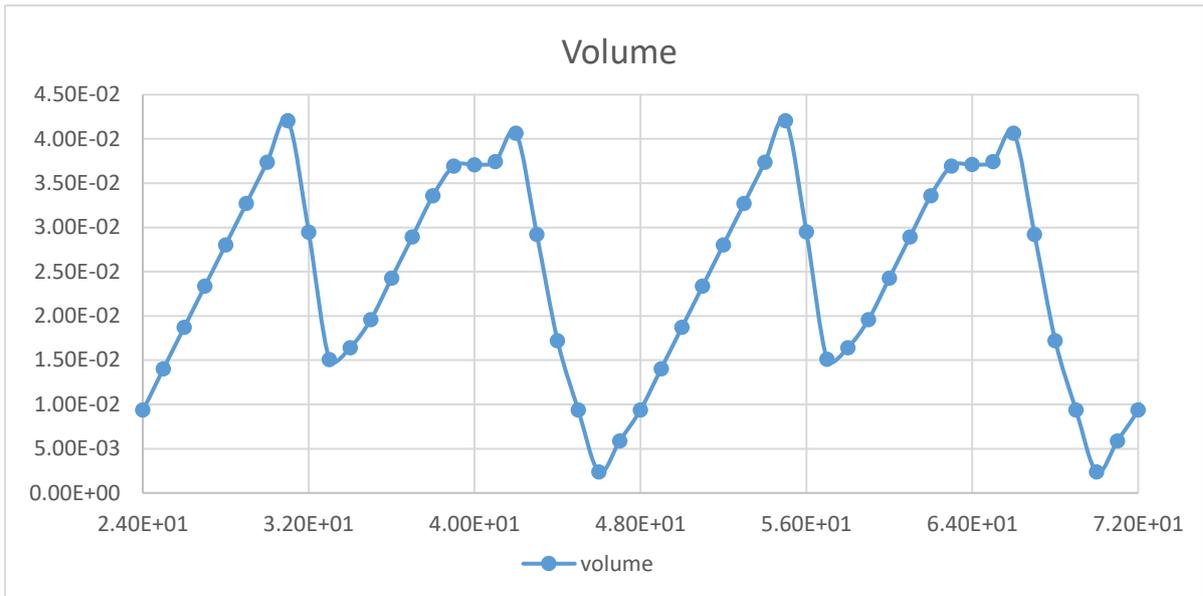


Figura 32. Variación del volumen del depósito. Caso inicial_Propano. Periodo de 2 días.

La variación del volumen del depósito se produce siempre por debajo del nivel máximo, por lo que no hay puntos de exceso, y por encima del nivel mínimo, por lo que tampoco llega a vaciarse en ningún momento del día, *Figura 32*.

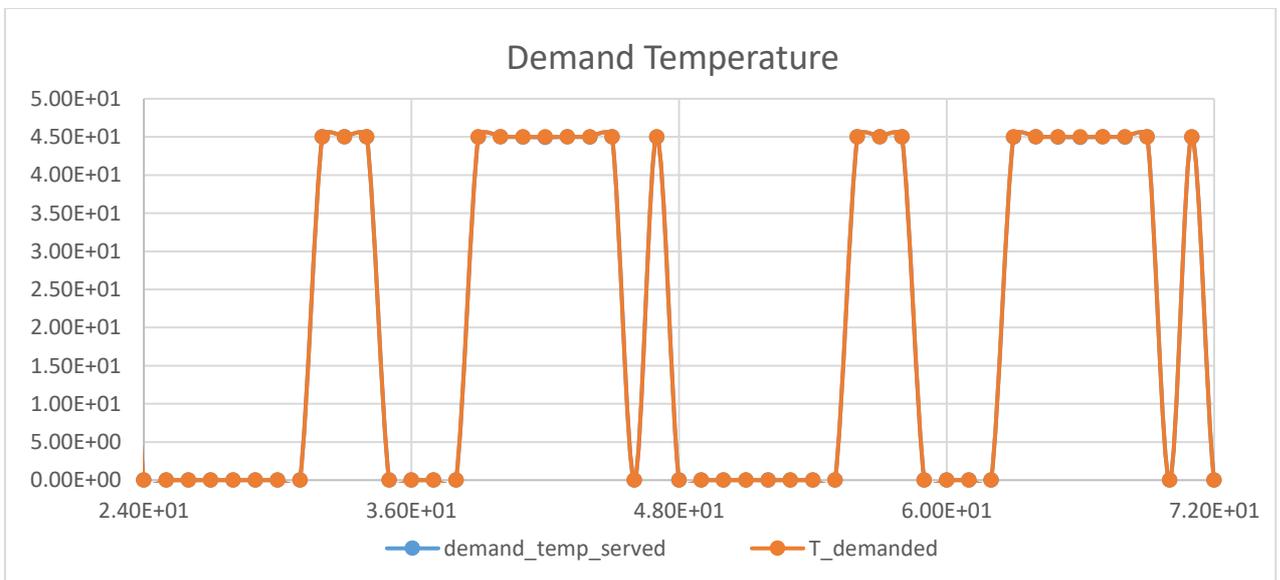


Figura 33. Temperatura demandada y Temperatura servida. Caso inicial_Propano. Periodo de 2 días.

Finalmente, con la *Figura 33*, como a partir del primer día la gráfica de la temperatura servida y la de temperatura demandada se vuelven coincidentes.

1.5.3.2.2. Caso 1.Propano.

Se procede a evaluar la bomba de propano con la distinción tarifaria de 14 horas, bajo los mismos supuestos con los que se estudió la máquina de CO2.

Los resultados obtenidos que hacen que se cumpla la demanda, son los siguientes:

Valores del sistema	
Temp. Producción ACS	72 °C
Scale HP	0.00647
Volumen	0.065 m ³
COP	6.49
Consumo diario	1.04 kWh
Consumo anual	379.6 kWh

Tabla 6. Resultados CASO 1_Propano. 14 horas.

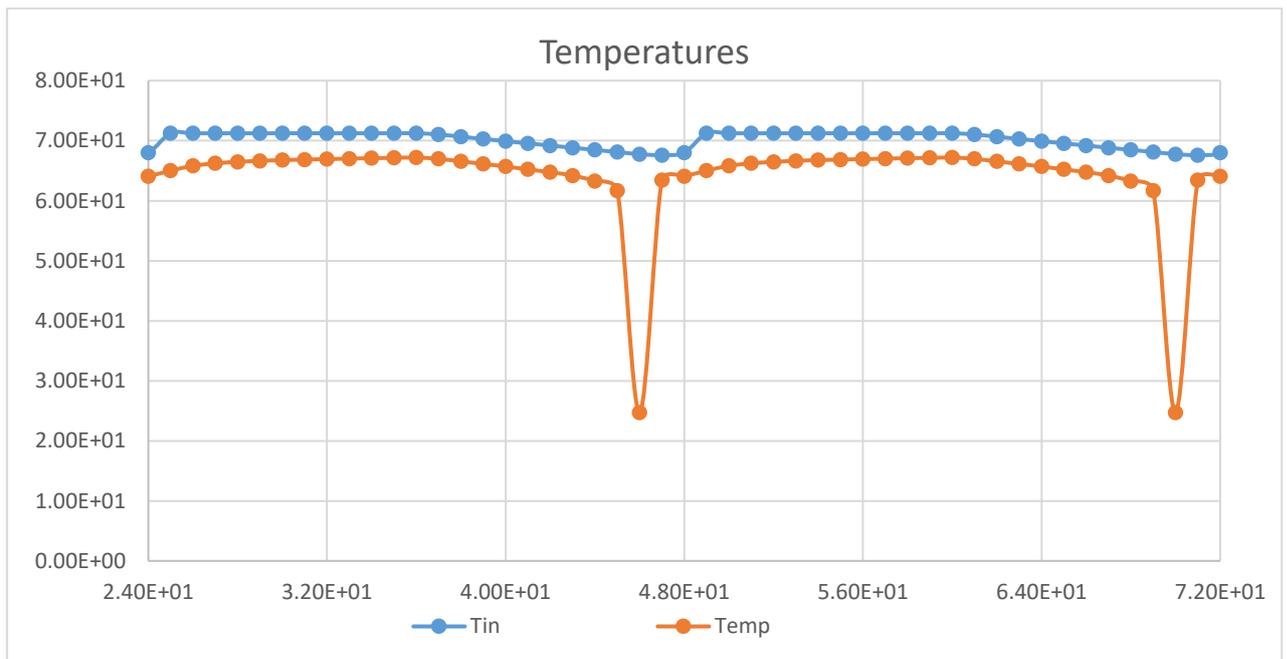


Figura 34. Temperatura de entrada al depósito y Temperatura del depósito. Caso 1_Propano. Periodo de 2 días.

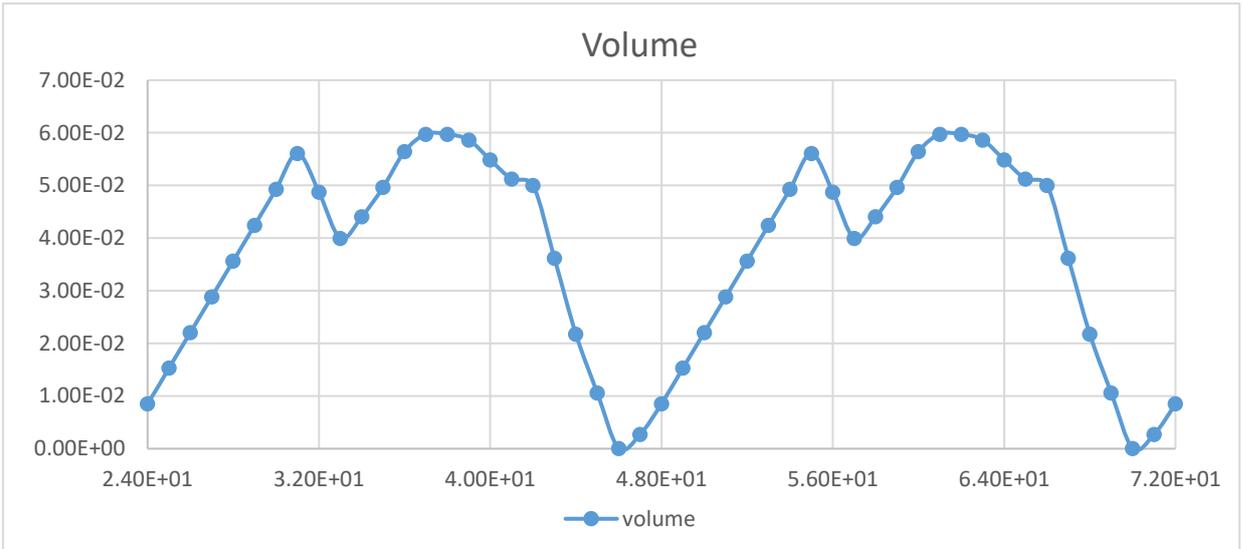


Figura 35. Variación del volumen del depósito. Caso 1_Propano. Periodo de 3 días.

La Figura 34 y la Figura 35, representan las variaciones de temperatura y de volumen del depósito para este caso. Se observa un punto de vaciado del depósito dos horas antes del final del día, que concuerda con la caída de temperatura, debido a que el aire que en esos momentos se encuentra en el depósito está a mucha menor temperatura que el agua.

Como último paso de este caso, se debe verificar cómo queda la demanda. Queda reflejado que la demanda queda abastecida, Figura 36.

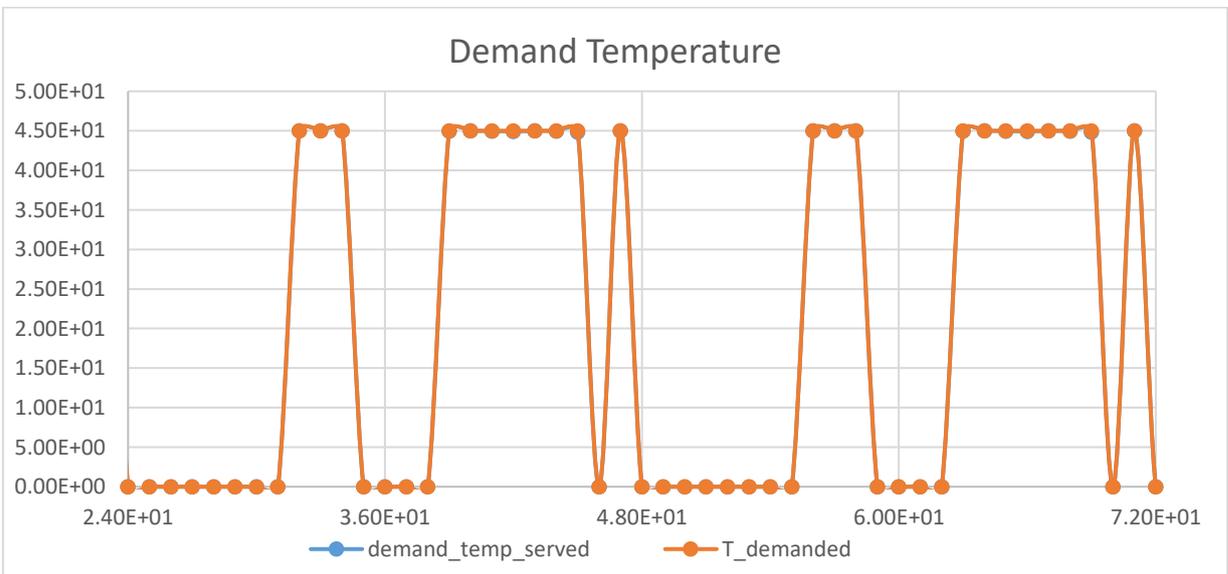


Figura 36. Temperatura demandada y Temperatura servida. Caso 1_Propano. Periodo de 3 días

1.5.3.2.3. Caso 2.Propano.

El caso 2 se corresponde a la **distinción tarifaria de tres periodos**. Con los siguientes resultados se verá cómo se comporta la bomba de propano para esta distribución de funcionamiento de 12 horas.

Los resultados obtenidos que hacen que se cumpla la demanda, son los siguientes:

Valores del sistema	
Temp. Producción ACS	67 °C
Scale HP	0.007246
Volumen	0.04 m ³
COP	6.94
Consumo diario	0.924 kWh
Consumo anual	337.3 kWh

Tabla 7. Resultados CASO 2_Propano. 12 horas.

Respecto al comportamiento de la temperatura en el depósito, se puede analizar gracias a la *Figura 37*, donde se observan cómo se mantiene un valor mayormente constante durante el día, exceptuando al final del mismo.

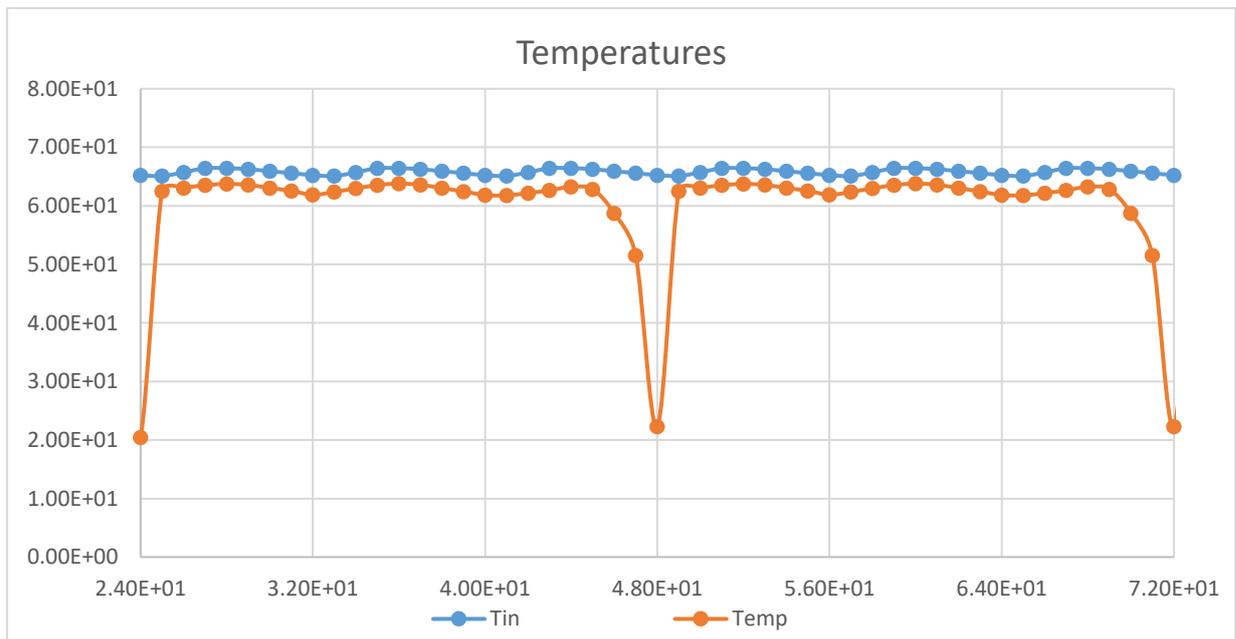


Figura 37. Temperatura de entrada al depósito y Temperatura del depósito. Caso 2_Propano. Periodo de 2 días.

La caída de temperatura en el tanque, hasta casi valores de temperatura ambiente, se corresponde con los puntos donde se produce una caída importante del nivel de agua del mismo, *Figura 38*.

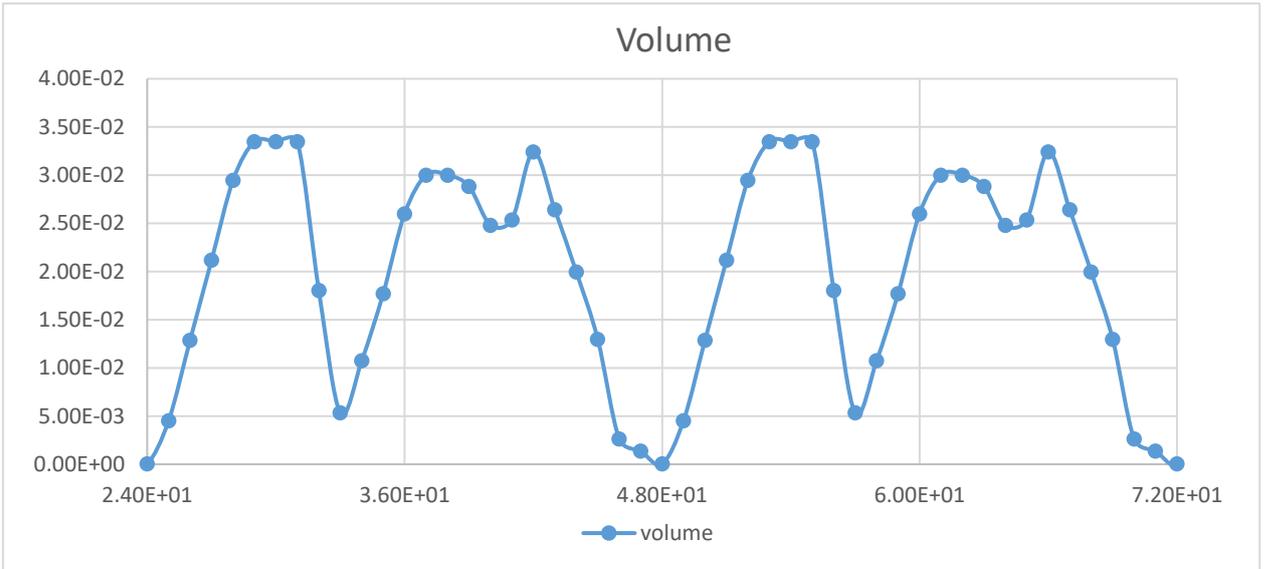


Figura 38. Variación del volumen del depósito. Caso 2_Propano. Periodo de 2 días.

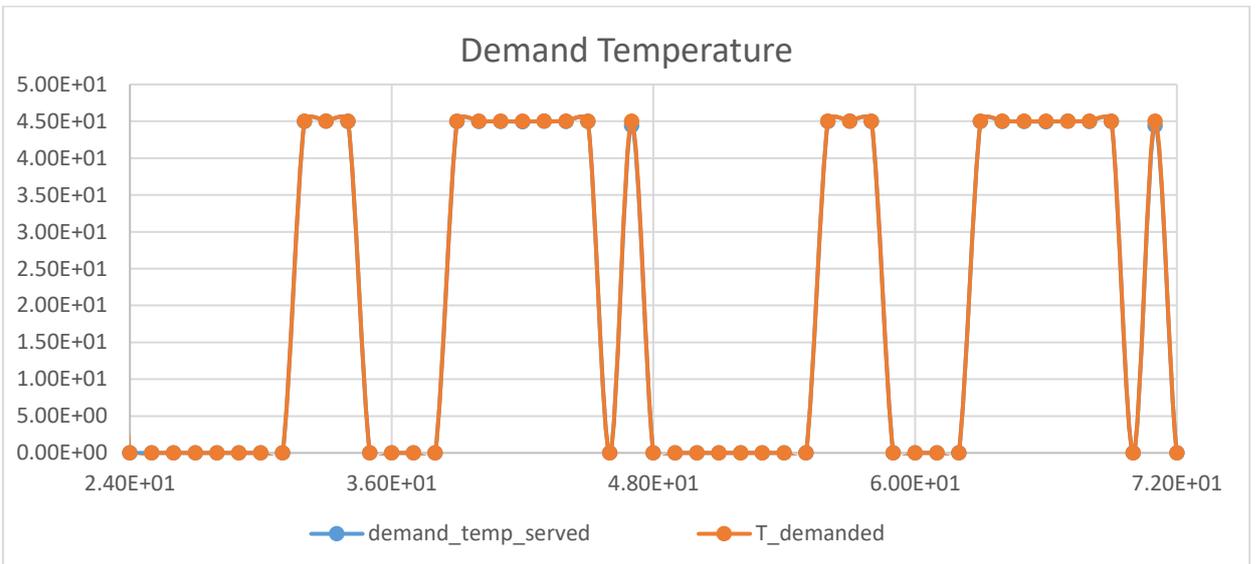


Figura 39. Temperatura demandada y Temperatura servida. Caso 1_Propano. Periodo de 2 días

Sólo queda verificar la demanda. Con la Figura 39, queda reflejado que con las dimensiones establecidas en la Tabla 7 se logra el objetivo, y la demanda es satisfecha para la distinción tarifaria asignada.

1.5.4. Casos de estudio. Caldera de Gas Natural.

En este apartado se pretende exponer los resultados en cuanto a **consumo de combustible, y de energía consumida por la caldera** para el calentamiento del agua, **con el fin de poder realizar una posterior comparativa**, frente a los valores obtenidos para la tecnología de bomba de calor, en el apartado de conclusiones.

La caldera solamente entra en funcionamiento en aquellos momentos en los que el usuario demanda agua caliente, por lo que implica un abastecimiento inmediato de la demanda. **La caldera calienta el caudal de agua que se requiere en cada instante desde la temperatura de red hasta los 60°C.**

Se ha escogido una caldera de gas natural, por ser una de las tecnologías más convencionales para los sistemas de ACS. No se ha utilizado ningún modelo del mercado, ya que el planteamiento pretende ser general, **pero si se ha establecido como valor de rendimiento de la misma un 97%**, ya que es el parámetro que determina la calidad de la caldera a la hora de calentar el agua para el consumo. Además, debido a que el **CTE especifica una contribución solar mínima** según la zona climática, se ha supuesto un 60% de la misma, **y por consiguiente la caldera cubriría el 40% restante**, y no el total de la demanda.

Con los datos de caudal de la demanda, se han obtenido los siguientes resultados:

<i>Valores del sistema</i>	
<i>Temp. Producción ACS</i>	60 °C
<i>PCI Gas Natural</i>	10,83 kWh/Nm ³
<i>Rendimiento</i>	0.97
<i>Consumo diario combustible</i>	3.582 kWh
<i>Consumo anual combustible</i>	1307.25 kWh

Tabla 8. Resultados caldera de gas natural.

Los dos valores de consumo de la *Tabla 8*, hacen referencia a la energía que consume la caldera en su proceso de combustión para el calentamiento del caudal que se demanda, que se obtiene a partir de la potencia de quemado del combustible.

1.6. CONCLUSIONES.

En este apartado se van a comentar los resultados obtenidos en el presente proyecto, con el objetivo de valorar cada una de las diferentes alternativas presentadas, y finalmente poder concluir cuales son las ventajas y desventajas de las mismas.

Por un lado se debe comparar las ventajas e inconvenientes según el tipo de bomba con el que trabaje el sistema de ACS. El foco del proyecto es la bomba de calor de CO₂, pero la comparativa frente a otro tipo de máquinas permitirá una visión más completa de esta tecnología. Y por otro lado, también se comentará cómo influye la distinción tarifaria, que afectará directamente sobre el coste de funcionamiento de la instalación, junto con el rendimiento de la misma.

Como culminación, se busca determinar si la sustitución de los sistemas convencionales de ACS por tecnologías más novedosas, como son las bombas de calor, que en teoría pretenden introducirse en el mercado energético como la alternativa ecológica a los calentadores eléctricos, pero sobre todo a los que funcionan con combustibles fósiles, provocan realmente una mejora importante sobre el funcionamiento energético de las viviendas.

1.6.1.1. Bomba de CO₂ vs bomba de Propano.

La primera conclusión que se puede extraer de los resultados, es que **la demanda puede ser abastecida, con cualquier distinción tarifaria, por ambas bombas de calor**, sea de CO₂ o de propano.

Para todos los casos de estudio, **la bomba de propano requiere un tamaño ligeramente inferior al de la de CO₂ para abastecer la demanda**, mientras que para ambos tipos de bomba los **depósitos que requieren son de idénticas dimensiones**. Esta diferencia de tamaño podría hacer pensar que el consumo de la bomba de propano será menor que el de la CO₂, sin embargo, sucede lo contrario. **El consumo medio diario, de los tres casos, de la bomba de propano es entorno a un 22% mayor al consumo de la de CO₂.**

		PROPANO	CO2	Diferencia
Caso inicial	COP	8.15	9.68	16 %
	Consumo anual	291.3 kWh	240.5 kWh	17 %
Caso 1	COP	6.49	8.93	27 %
	Consumo anual	379.6 kWh	279.2 kWh	26 %
Caso 2	COP	6.94	9.01	23 %
	Consumo anual	337.3 kWh	262.4 kWh	22 %

Tabla 9. Resumen valores COP y Consumo diario.

Respecto al rendimiento, la diferencia entre los valores resultantes se asemeja a los porcentajes que diferencian los valores de consumo. No obstante, cabe destacar que la diferencia de los valores de los casos con distinción tarifaria respecto al COP del caso inicial, es mucho mayor en la bomba de propano que en la de CO2. **Esto implica que el ajuste del horario de trabajo afecta más negativamente a la bomba de propano.**

Por todo lo comentado, y en base a los valores obtenidos, **la máquina con menor consumo y mejor rendimiento sería la mejor opción, en este caso la bomba de CO2.** Esto quiere decir que dicha bomba aprovecha mejor la energía que consume, y por consecuencia **realiza un calentamiento de agua mucho más óptimo que la bomba de propano.**

1.6.1.2. Distinción tarifaria.

Una vez analizado las posibilidades en cuanto a la selección de la bomba de calor, **se debe valorar en qué condiciones de trabajo se obtendrán mejores valores de COP y de consumo, pero además se deberá tener en cuenta estos aspectos respecto a los posibles precios de la energía,** según la bomba trabaje en un horario u otro.

	Sin distinción tarifaria	Tarifa de 1 periodo (14 horas)	Diferencia	Tarifa de 3 periodos (12 horas)	Diferencia
COP	9.68	8.93	8 %	9.01	7 %
Consumo anual	240.5 kWh	279.2 kWh	14 %	262.4 kWh	8 %

Tabla 10. Comparativa de valores de COP y Consumo, según la distinción tarifaria. Bomba de CO2.

La *Tabla 10* pretende mostrar las diferencias existentes entre los valores obtenidos con la aplicación tarifaria del caso 1 y 2, respecto a los valores del caso inicial en los que la bomba trabaja de forma continua durante el día, es decir, que no se le ha aplicado ninguna restricción horaria.

Antes de entrar en el análisis de las tres alternativas, se va a comentar brevemente y de forma generalizada la discriminación horaria que hacen las compañías suministradoras de energía.

DISCRIMINACIÓN HORARIA	
Horas punta	12:00 a 22:00 (+1 hora en verano)
Horas valle	22:00 a 12:00 (+1 hora en verano)
Horas supervalle	01:00 a 07:00

Tabla 11. Discriminación horaria.

Aclaración: Cada compañía asigna para cada una de sus tarifas el precio de cada franja horaria, y en algunas ocasiones las horas valle y supervalle tienen el mismo coste. No obstante, sin entrar en lo que oferta una u otra empresa, siempre en una tarifa eléctrica vendrá especificado que horario se considera como punta (mayor precio por kWh) y cuál como valle (menor precio por kWh), o en el caso de no hacer distinción, quedaría establecido el precio fijo para el kWh.

Se puede observar que las diferencias entre los tres escenarios son notables. Sin embargo, **las horas de trabajo de la bomba en los casos con distinción tarifaria son muchas menos**, siendo la mitad para el caso de los tres periodos y de diez horas menos en el caso de un periodo.

Los rendimientos de la bomba son muy buenos en los tres casos, por lo que quizás sería un aspecto de menor peso a la hora de descartar una opción frente a las otras dos. **Respecto a los consumos, queda claro que la tarifa de un periodo de 14 horas es la que más se aleja**, siendo su valor **un 14% superior al del caso inicial y un 6% mayor al del caso de 3 periodos**, debido a las dos horas más de trabajo, **pero la ventaja** que presenta es que su **consumo se concentran en las horas nocturnas**, que poseen un precio menor.

Concretando lo expuesto anteriormente:

- **La tarifa de 12 horas** contiene franjas de funcionamiento de la bomba en horas punta, por lo que **para que saliera más rentable que la tarifa de 14 horas, el precio del kWh de punta tendría que ser un máximo de un 6% más caro respecto al precio de valle.**
- **Para que la mejor opción fuera el caso inicial**, sin distinción tarifaria, **el precio por kWh sólo podría ser un 14% más caro respecto al precio de la tarifa de 14 horas.**

- **Comparando el caso inicial con el caso de 12 horas**, habría que ver si el precio de la hora punta respecto al precio constante de la tarifa sin discriminación horaria, ya que si son muy semejantes la opción de los tres periodos será más económica, debido a que, en este escenario, la bomba sólo está encendida en la franja punta durante dos horas.

Como conclusión final, se podría decir que este proyecto ha dejado demostrado que **la bomba de CO2 es más eficiente que la de Propano**, para el sistema de ACS de una vivienda de cuatro personas con una temperatura media de consumo de 45°C, y con condiciones ambientales estándar. **A pesar de estos resultados, hay que ser prudentes, ya que la bomba de Propano ha sido construida y medida, por lo que los valores están verificados, mientras que los de la bomba de CO2 todavía no han sido contrastados a través de un modelo real.**

Además, la aplicación de una discriminación tarifaria, aunque implica unos valores más bajos de rendimiento y mayores consumos que sin no se realizara, dicha penalización de los resultados, por tener que producir agua a más temperatura, no es lo suficientemente importante respecto al ahorro económico que permite lograr este ajuste de las horas de funcionamiento de la bomba durante el día. **El ahorro existente entre la no aplicación de distinción tarifaria y el uso de una tarifa con la bomba trabajando en horas punta, como sucede en el caso 2, no es muy importante (menor del 5% anual), pero comparado con una tarifa con la bomba funcionando en horas valle, como en el caso 1, el ahorro puede ser superior al 20% anual.**

1.6.1.3. Bomba de calor vs Caldera de gas.

¿Es la bomba de calor, una forma de ahorro energético para las viviendas?, ¿cuáles son los valores que resultan al comparar una caldera de gas con una bomba de calor? Para poder aclarar estas preguntas **se tomarán los valores de consumo anual (kWh) de las dos bombas de calor, y los de la caldera de gas** anteriormente comentados, con los que **se podrá conocer si se produce ahorro**. Además, con los **factores de conversión de energía final** extraídos de la normativa se procederá a **calcular las emisiones de CO2 asociadas**.

	CALDERA DE GAS	BOMBA DE CO2	BOMBA DE PROPANO
CONSUMO ANUAL (kWh)	1307.25	240.5	291.3
AHORRO (%)	-	81.6	77.7

Tabla 12. Comparación consumos bombas de calor vs caldera de gas.

Como se puede ver de los valores de la *Tabla 12*, los **porcentajes de ahorro** de los consumos de las bombas de calor frente a los de la caldera de gas **son altísimos, ambos en torno al 80%**. Esto demuestra que la tendencia hacia el impulso de estas tecnologías en los hogares está muy bien fundamentada.

Con los valores de la *Figura 19*, se han calculado los valores de emisiones asociados al consumo de energía eléctrica por parte de las bombas de calor, y de gas natural por parte de la caldera.

Factores de emisiones de CO2			
	Fuente	Valores aprobados	Valores previos (****)
		kg CO2 /kWh E. final	kg CO2 /kWh E. final
Electricidad convencional Nacional	(*)	0,357	
Electricidad convencional peninsular	(**)	0,331	0,649
Electricidad convencional extrapeninsular	(**)	0,833	0,981
Electricidad convencional Baleares	(**)	0,932	
Electricidad convencional Canarias	(**)	0,776	
Electricidad convencional Ceuta y Melilla	(**)	0,721	
Gasóleo calefacción	(***)	0,311	0,287
GLP	(***)	0,254	0,244
Gas natural	(***)	0,252	0,204
Carbón	(***)	0,472	0,347
Biomasa no densificada	(***)	0,018	neutro
Biomasa densificada (pelets)	(***)	0,018	neutro

Figura 40. Factores de conversión de energía a emisiones de CO2. [13]

Los resultados obtenidos, son los siguientes:

	EMISIONES DE CO2 (kgCO2)	Diferencia (%)
CALDERA DE GAS NATURAL	329.43	-
BOMBA DE CO2	85.86	73.9
BOMBA DE PROPANO	103.99	68.4

Tabla 13. Resultados de emisiones de CO2.

Como sucede con los consumos, las diferencias existentes en las emisiones de CO2 son también muy notables, con **aproximadamente un 70% menos de emisiones para ambas bombas frente al valor de la caldera.**

1.7. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Consejo Europeo, 24 de octubre de 2014.
- http://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_data/docs/pressdata/en/ec/145397.pdf
 - https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_es#tab-0-0
- [2] Eficiencia Energética, sector de la edificación: Entrevista a María Andérez, experta en el ámbito nacional de la eficiencia energética en el sector de la edificación.
<http://smartcities.i-ambiente.es/?q=entrevistas/maria-anderez>
- [3] Libro de la Energía en España 2016. Página web del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo: apartado de Energía (Ministerio para la Transición Ecológica).
<http://www.mincotur.gob.es/energia/balances/Balances/Paginas/Balances.aspx>
- [4] Documento Básico HE Ahorro de energía, sección HE 4. Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria.
<https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DBHE.pdf>
- [5] Diario Oficial de la Unión Europea. Decisión de la Comisión de 9 de noviembre de 2007.
http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/etiqueta-ecologica-de-la-union-europea/d_bombas_tcm30-190558.pdf
- [6] IDEA. Guía Técnica Agua Caliente Sanitaria Central.
http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_08_Guia_tecnica_agua_caliente_sanitaria_central_906c75b2.pdf
- [7] The Linde Group. Suministrador líder de gases refrigerantes.
http://www.abellolinde.es/es/products_and_supply/refrigerants/natural_refrigerants/r744_carbon_dioxide/index.html
- [8] Informe de Alberto Cavallini, *Departamento de Física Técnica de la Universidad de Padova*, para el EUROPEAN SEMINAR–CO₂ AS A REFRIGERANT. *Centro Studi Galileo Industria & Formazione*.
<http://www.centrogalileo.it/nuovapa/Articoli%20tecnici/INGLESE%20CONVEGNO/CO2/Cavallini%20-%20Milano04CO2.pdf>
- [9] Informe técnico IDEA 004. Factores decisivos en la elección de sistemas de generación de calor y frío. Parte I. Ámbito residencial. 25/05/2018.
<http://www.idae.es/publicaciones/factores-decisivos-en-la-eleccion-de-sistemas-de-generacion-de-calor-y-frio-parte-i>
- [10] Informe de Danfoss, marzo de 2015. *El CO₂ como agente refrigerante: brillante desde el punto de vista económico y ecológico*.
http://files.danfoss.com/technicalinfo/dila/01/DKRCI.PB.000.N4.05_LR.pdf

- [11] IMST-ART v3.90 Professional.
- [12] Informe Danfoss: Designing subcritical and transcritical CO2 systems and selecting suitable Danfoss components.
http://files.danfoss.com/TechnicalInfo/Dila/01/DKRCEPAR1A102_The%20Food%20Retail%20CO2%20application%20handbook_DILA.pdf
- [13] Trnsys 16. Simulation Studio.
- [14] FACTORES DE EMISIÓN DE CO2 y COEFICIENTES DE PASO A ENERGÍA PRIMARIA DE DIFERENTES FUENTES DE ENERGÍA FINAL CONSUMIDAS EN EL SECTOR DE EDIFICIOS EN ESPAÑA. Documento Reconocido del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE).

1.8. LISTA DE TABLAS.

TABLA 1. COMPARATIVA DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DEL CO ₂	18
TABLA 2. RESULTADOS CASO INICIAL_CO ₂ (REFERENCIA).	38
TABLA 3. RESULTADOS CASO 1_CO ₂ . 14 HORAS.....	40
TABLA 4. RESULTADOS CASO 2_CO ₂ . 12 HORAS.....	42
TABLA 5. RESULTADOS CASO INICIAL_PROPANO.....	45
TABLA 6. RESULTADOS CASO 1_PROPANO. 14 HORAS.....	47
TABLA 7. RESULTADOS CASO 2_PROPANO. 12 HORAS.....	49
TABLA 8. RESULTADOS CALDERA DE GAS NATURAL.....	51
TABLA 9. RESUMEN VALORES COP Y CONSUMO DIARIO.	53
TABLA 10. COMPARATIVA DE VALORES DE COP Y CONSUMO, SEGÚN LA DISTINCIÓN TARIFARIA. BOMBA DE CO ₂	53
TABLA 11. DISCRIMINACIÓN HORARIA.....	54
TABLA 12. COMPARACIÓN CONSUMOS BOMBAS DE CALOR VS CALDERA DE GAS.....	55
TABLA 13. RESULTADOS DE EMISIONES DE CO ₂	56

1.9. LISTA DE FIGURAS.

FIGURA 1. MARCO ESTRATÉGICO EN MATERIA DE CLIMA Y ENERGÍA DE LA UNIÓN EUROPEA PARA LOS AÑOS 2020 Y 2030 [2].....	12
FIGURA 2. ESTRUCTURA DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE LOS HOGARES POR FUENTES ENERGÉTICAS, 2000-2015 [3].	13
FIGURA 3. ESTRUCTURA DE CONSUMO DE ENERGÍA POR USOS DEL SECTOR RESIDENCIAL EN ESPAÑA [3].	13
FIGURA 4. ESQUEMA DE PRODUCCIÓN INSTANTÁNEA DE ACS [6].	16

FIGURA 5. PRODUCCIÓN DE ACS CON INTERACUMULADOR [6].....	16
FIGURA 6. PRODUCCIÓN DE ACS CON ACUMULADOR [6].....	17
FIGURA 7. EQUIPOS DE ACS EN EL HOGAR [9].	20
FIGURA 8. EQUIPOS DE CALEFACCIÓN EN EL HOGAR [9].....	20
FIGURA 9. ESQUEMA PROCEDIMIENTOS: DISEÑO DE LA BOMBA.	25
FIGURA 10. ESQUEMA DE LOS COMPONENTES QUE CONFORMAN LA BOMBA DE CALOR.	25
FIGURA 11. EJEMPLOS DE CÓMO VARIA EL COP SEGÚN SE MODIFIQUE LA PRESIÓN DE DESCARGA DEL GAS COOLER. [12].....	27
FIGURA 12. COP HEATING CORRELACIONADO Y EXPERIMENTAL.....	28
FIGURA 13. TRABAJO DEL COMPRESOR EXPERIMENTAL Y CORRELACIONADO.	29
FIGURA 14. POTENCIA FRIGORÍFICA EXPERIMENTAL Y CORRELACIONADA.	30
FIGURA 15. POTENCIA CALORÍFICA EXPERIMENTAL Y CORRELACIONADA.	30
FIGURA 16. TEMPERATURE APPROACH EXPERIMENTAL Y CORRELACIONADO.....	31
FIGURA 17. TEMPERATURA DEL CO ₂ A LA SALIDA DEL GAS COOLER, EXPERIMENTAL Y CORRELACIONADA.	32
FIGURA 18. PRESIÓN DE DESCARGA EXPERIMENTAL Y CORRELACIONADA.	33
FIGURA 19. RELACIÓN DE PRESIONES EXPERIMENTAL Y CORRELACIONADA.	33
FIGURA 20. TEMPERATURA DEL CO ₂ A LA SALIDA DEL COMPRESOR EXPERIMENTAL Y CORRELACIONADA.	34
FIGURA 21. ESQUEMA APARTADO: EVALUACIÓN DE LA BOMBA.	35
FIGURA 22. TEMPERATURA DE ENTRADA AL DEPÓSITO. CASO INICIAL_ CO ₂ . PERIODO DE 2 DÍAS.	39
FIGURA 23. VARIACIÓN DEL VOLUMEN DEL DEPÓSITO. CASO INICIAL_ CO ₂ . PERIODO DE 2 DÍAS.....	39
FIGURA 24. TEMPERATURA DEMANDADA Y TEMPERATURA SERVIDA. CASO INICIAL_ CO ₂ . PERIODO DE 2 DÍAS.	40
FIGURA 25. TEMPERATURA DE ENTRADA AL DEPÓSITO Y TEMPERATURA DEL DEPÓSITO. CASO 1_ CO ₂ . PERIODO DE 2 DÍAS.	41
FIGURA 26. VARIACIÓN DEL VOLUMEN DEL DEPÓSITO. CASO 1_ CO ₂ . PERIODO DE 2 DÍAS.	41

FIGURA 27. TEMPERATURA DEMANDADA Y TEMPERATURA SERVIDA. CASO 1_CO2. PERIODO DE 3 DÍAS.....	42
FIGURA 28. TEMPERATURA DE ENTRADA AL DEPÓSITO Y TEMPERATURA DEL DEPÓSITO. CASO 2_CO2. PERIODO DE 2 DÍAS.	43
FIGURA 29. VARIACIÓN DEL VOLUMEN DEL DEPÓSITO. CASO 2_CO2. PERIODO DE 2 DÍAS.	43
FIGURA 30. TEMPERATURA DEMANDADA Y TEMPERATURA SERVIDA. CASO 2_CO2. PERIODO DE 2 DÍAS.....	44
FIGURA 31. TEMPERATURA DE ENTRADA AL DEPÓSITO. CASO INICIAL_PROPANO. PERIODO DE 2 DÍAS.	45
FIGURA 32. VARIACIÓN DEL VOLUMEN DEL DEPÓSITO. CASO INICIAL_PROPANO. PERIODO DE 2 DÍAS.	46
FIGURA 33. TEMPERATURA DEMANDADA Y TEMPERATURA SERVIDA. CASO INICIAL_PROPANO. PERIODO DE 2 DÍAS.	46
FIGURA 34. TEMPERATURA DE ENTRADA AL DEPÓSITO Y TEMPERATURA DEL DEPÓSITO. CASO 1_PROPANO. PERIODO DE 2 DÍAS.....	47
FIGURA 35. VARIACIÓN DEL VOLUMEN DEL DEPÓSITO. CASO 1_PROPANO. PERIODO DE 3 DÍAS.	48
FIGURA 36. TEMPERATURA DEMANDADA Y TEMPERATURA SERVIDA. CASO 1_PROPANO. PERIODO DE 3 DÍAS.....	48
FIGURA 37. TEMPERATURA DE ENTRADA AL DEPÓSITO Y TEMPERATURA DEL DEPÓSITO. CASO 2_PROPANO. PERIODO DE 2 DÍAS.....	49
FIGURA 38. VARIACIÓN DEL VOLUMEN DEL DEPÓSITO. CASO 2_PROPANO. PERIODO DE 2 DÍAS.	50
FIGURA 39. TEMPERATURA DEMANDADA Y TEMPERATURA SERVIDA. CASO 1_PROPANO. PERIODO DE 2 DÍAS.....	50
FIGURA 40. FACTORES DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA A EMISIONES DE CO2. [13].....	56

2. PLIEGO DE CONDICIONES

ÍNDICE

2.	<i>PLIEGO DE CLAUSULAS ADMINISTRATIVAS</i>	67
2.1.	Disposiciones generales.	67
2.1.1.	Descripción del proyecto.....	67
2.2.	Disposiciones facultativas.	67
2.2.1.	El promotor.	67
2.2.2.	El proyectista.....	68
2.3.	Disposiciones económicas.....	68

2. PLIEGO DE CLAUSULAS ADMINISTRATIVAS.

Debido a las características de este proyecto, el pliego de condiciones aplicable al mismo es el pliego de cláusulas administrativas.

2.1. Disposiciones generales.

2.1.1. *Descripción del proyecto.*

El proyecto en cuestión, consiste en el diseño de una bomba de calor para la producción de agua caliente sanitaria, y su posterior evaluación dentro de un sistema de ACS con acumulación y recuperación de calor de las aguas grises de la instalación, con la finalidad de abastecer la demanda diaria de una vivienda de cuatro personas.

Para la realización del modelo de la bomba, se ha procedido en primer lugar al dimensionado de los componentes de la misma. Seguidamente se han obtenido las expresiones matemáticas necesarias para dejar definido el modelo, y poder así introducirlo dentro del sistema global que conforma la instalación de ACS. Finalmente se ha determinado las dimensiones óptimas de la bomba de calor y del depósito de acumulación, al igual que el control óptimo de encendido y apagado de la máquina, para así lograr las mejores condiciones de funcionamiento de la instalación.

2.2. Disposiciones facultativas.

2.2.1. *El promotor.*

Nos encontramos ante un proyecto propuesto para un trabajo de fin de grado, por lo que se considerará como promotores del mismo a los directores o tutores del mismo. Como promotor indirecto del presente proyecto, también se considerará a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, de la Universidad Politécnica de Valencia, al ser la institución gestora del mismo.

Obligaciones del promotor:

- Establecer las condiciones generales del proyecto.
- Facilitar la documentación necesaria para la realización del proyecto.
- Suscribir el acta de presentación de la documentación del proyecto.

2.2.2. *El proyectista.*

Obligaciones del proyectista:

- Realizar el proyecto según las condiciones fijadas por el promotor.
- Consultar con el promotor las propuestas y las posibles modificaciones durante la realización del proyecto.
- Cumplir con la normativa establecida por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, en relación a los trabajos final de grado.
- Mantener informado al promotor sobre los progresos del proyecto.
- Cumplir con los plazos acordados con el promotor.
- Lograr un resultado coherente, que se ajuste a los objetivos fijados antes del comienzo del mismo.

2.3. Disposiciones económicas.

Debido a que el proyecto tiene un carácter académico, que se ajusta a la normativa de la Universidad Politécnica de Valencia, no existen aspectos económicos en cuanto a remuneración de ninguna de las partes a causa de la realización del presente proyecto.

3. PRESUPUESTO

ÍNDICE

3.1.	<i>INTRODUCCIÓN.</i>	74
3.2.	<i>RESUMEN DEL PRESUPUESTO.</i>	74
3.2.1.	MANO DE OBRA.	74
3.2.2.	MATERIALES Y EQUIPOS.	74
3.2.3.	SISTEMA DE AGUA CALIENTE SANITARIA.	75

3.1. INTRODUCCIÓN.

En este documento se especifica el coste de los recursos empleados para el desarrollo del presente proyecto. Se especifican los gastos de mano de obra, materiales, y de los componentes principales que conforman la bomba. Todos estos apartados conforman el que sería el presupuesto global para el *Diseño de un sistema para la producción de agua caliente sanitaria mediante el uso de bomba de calor.*

3.2. RESUMEN DEL PRESUPUESTO.

Descripción		Importe	
MANO DE OBRA		7750.45 €	
MATERIALES Y EQUIPOS		7755.70 €	
BOMBA DE CALOR		2210.13 €	
SUBTOTAL		17716.28 €	
		Base imponible	Importe
Costes indirectos	10 %	9965.83 €	996.58 €
IVA	21 %	7750.45 €	1627.60 €
TOTAL		20340.46 €	

3.2.1. MANO DE OBRA.

Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Importe
1	MANO DE OBRA			€	€
1.1.	Graduado en Ing. Mecánica	h.	360	18.88	6796.80
1.2.	Ingeniero jefe		3	47.55	125.01
1.3.	Ingeniero superior		20	37.55	625.00
TOTAL					7750.45 €

3.2.2. MATERIALES Y EQUIPOS.

Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Importe
2.1.	MATERIALES DE OFICINA			€	€
2.1.1	Paquete de folios	u.	1	4.50	4.50
2.1.2.	Bolígrafos		2	0.60	1.20
TOTAL					5.70 €

Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Importe
2.2.	<i>EQUIPOS Y SOFTWARE</i>			€	€
2.2.1	Ordenador Lenovo	%	20	800.00	160.00
2.2.2.	Software IMST-ART	u.	1	-	0.00
2.2.3.	Software TRNSYS		1	7590.00	7590.00
	TOTAL				7750.00 €

NOTA: Para el coste del ordenador, se ha considerado el coeficiente de amortización (%) anual del mismo, establecido por la Agencia Tributaria.

3.2.3. SISTEMA DE AGUA CALIENTE SANITARIA.

En este apartado sólo se han tenido en cuenta los componentes principales que conforman un sistema de ACS, sin tener en cuenta tuberías, y accesorios secundarios.

Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Importe
3.	<i>SISTEMA DE ACS</i>			€	€
3.1.	Bomba de Calor de CO2				
3.1.2.	Evaporador. SWEP B12	u.	1	245.35	215.35
3.1.2.	Gas Coorler. SWEP B18		1	290.75	290.75
3.1.2.	Compresor semihermético HG CO2 Transcrítico		1	1280.42	585.42
3.1.2.	Válvula de expansión CO2		1	176.86	176.86
3.1.3.	Botella de líquido		1	90.50	87.5
	SUBTOTAL BOMBA				2083.88 €
3.2.	Intercambiador para recuperación de energía	u.	1	70.15	70.15
3.3.	Depósito de acumulación	u.	1	56.10	56.10
	TOTAL				2210.13 €

