



Trabajo Fin de Grado

Integración de bombas de calor con caldera de biomasa para una vivienda unifamiliar.

Integration of heat pumps with biomass boiler for a single-family house.

Autor

Javier Abad Arcos

Director

Javier Uche Marcuello

Titulación del autor

Grado en Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad de Zaragoza

2023

Resumen

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es analizar la integración de las bombas de calor con caldera de biomasa en entorno rural, con el fin de buscar cual es el diseño más apropiado que permita cubrir la demanda de climatización en una vivienda en una instalación conjunta.

Como se ha comentado el entorno de trabajo, donde se situará la vivienda objetivo de mi estudio, es en una zona rural de la provincia de Teruel.

Para la modelización de la vivienda y poder llevar a cabo una serie de simulaciones energéticas, voy a usar el programa DesignBuilder. El cual me proporcionará los datos de demanda de calefacción y de refrigeración de la vivienda para distintos periodos horarios (anual, mensual, diario y horario).

Además de usar la normativa actual que regula los aspectos energéticos de los edificios de nuestro país, voy a hacer una comparativa con distintas normativas y los cambios que se han introducido entre ellas. Las normativas que se compararán son:

- NBE-CT-1979(1): Periodo de construcción 1981-2007.
- CTE DB-HE 2006(3): Periodo de construcción 2008-2019.
- CTE DB-HE 2019(4): Periodo de construcción 2020-Actualidad.

Una vez que conozca las demandas de mi edificio en sus tres versiones, voy a usar el programa EES para poder diseñar la bomba de calor y caldera de biomasa. Cuando haya terminado el diseño de mis equipos, podre hacer simulaciones de cuál sería el rendimiento de mis equipos dependiendo de la demanda que hay cada hora del día de simulación.

La bomba de calor va a simularse con distintos refrigerantes para ver cual me ofrece mejores prestaciones. Los refrigerantes con los que voy a trabajar son los siguientes:

- R134-a
- R-22
- R-32
- R-290
- R-410-a

Para finalizar el trabajo voy a realizar un análisis económico y ambiental de la solución integrada.

MEMORIA

Índice de memoria

1. Introducción y objetivos	4
2. Modelado vivienda unifamiliar	8
2.1. Metodología	8
2.2. Características geométricas vivienda unifamiliar	9
2.3. Parámetros energéticos impuestos por la normativa	13
2.3.1. Valores límite de transmitancia	13
2.3.2. Permeabilidad de los huecos	14
2.3.3. Relación del cambio de aire	15
2.3.4. Ventilación mecánica	15
2.3.5. Puentes térmicos	16
2.3.6. Demanda ACS	18
2.3.7. Análisis de resultados	18
3. Modelado bomba de calor	29
4. Modelado caldera de biomasa	43
5. Análisis de Resultados	45
6. Análisis Ambiental	50
7. Análisis Económico	52
8. Conclusiones	59
9. Bibliografía	61
10. Índice de figuras	63

1. Introducción y objetivos

Actualmente uno de los principales retos por el que atraviesa nuestra sociedad es la reducción de nuestras emisiones de gases de efecto invernadero para frenar en la medida de lo posible el cambio climático. Además otro de los grandes problemas se encuentra en el ámbito energético, debido a la gran escalada en los precios de los combustibles fósiles y de los precios de la energía eléctrica. En el sector doméstico en particular, a partir de diferentes directivas europeas y normativas se está intentando implementar distintas estrategias que nos permitan ser más eficientes energéticamente. Todo esto previsto para un periodo de corto y largo plazo (años 2020, 2030 y 2050).

En España antes de 1979, cuando se aprobó la Norma Básica de la Edificación (NBE-CT-1979[1]), había una serie de documentos en los que no se sabía con exactitud que era de obligado cumplimiento y que no. No fue hasta 1979 que se establecían las condiciones térmicas de los edificios y que ampliaba y reforzaba el Decreto 1490/1975 [2].

El Documento Básico de Ahorro de Energía del código técnico de edificación (CTE DB-HE 2006[3]) nace para poder incluir en la normativa española una serie de Directivas europeas sobre la eficiencia energética de los edificios. Y estas directivas europeas imponen que se debe llevar a cabo una revisión periódica, por lo que el Documento Básico cambia varias veces a lo largo de los años que se encuentra en vigor. La última actualización del Código Técnico es el CTE DB-HE 2019[4] ya que como se indica en la Directiva 2010/31/UE [5] es obligatorio renovar los requerimientos que tengan relación con la eficiencia energética cada cinco años. Con esto se pretende hacer un control de la demanda y poder reducir en la medida de lo posible el consumo energético. Además esta versión del CTE nos impone el uso de las energías renovables en los edificios.

Como se ha comentado anteriormente, la modificación de la normativa tiene como objetivo reducir el consumo energético en el sector de la vivienda. Esto será una de las cosas que comprobaré en las simulaciones de DesignBuilder con las distintas versiones de mi casa. Pero si analizo los datos de consumo energético en España a lo largo de los años, puedo ver que este incrementa aunque las normativas hayan sido más estrictas. Ello es debido a que el poder adquisitivo de la mayoría de las familias españolas es bastante superior en 2023 que en 1990.

A continuación muestro una tabla con los consumos finales de energía en España en distintos años en el ámbito del hogar:

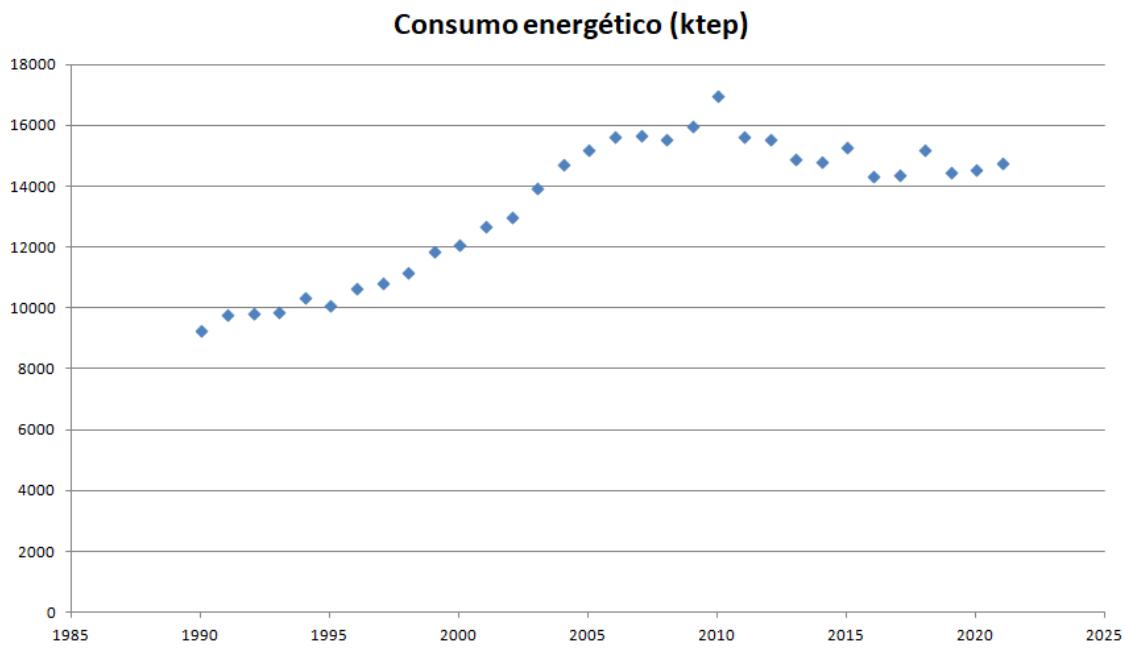


Figura 1 Consumo final energía hogares España 1990-2021. Elaboración propia con datos de IDAE.

Como se ha comentado la demanda energética es holgadamente superior en 2021 que en 1990. No obstante puedo ver que en los últimos años tras el pico de 2010 (16951,8 ktep) la demanda energética no solo ha sido frenada radicalmente sino que también ha disminuido debido a las exigencias implementadas con las nuevas normativas.

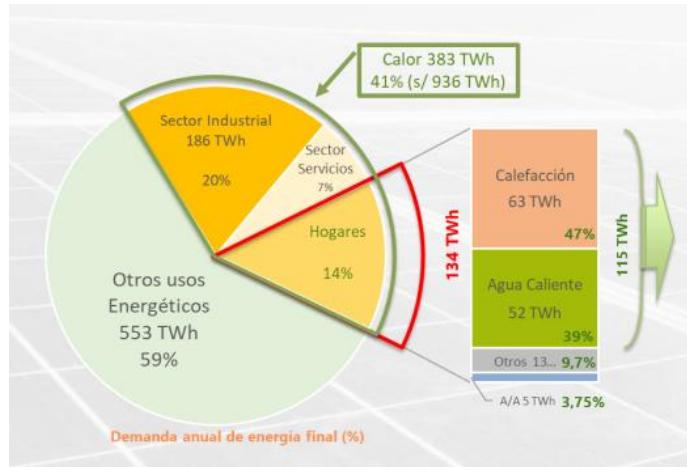


Figura 2 Porcentajes de Demanda anual de energía final en España. Iberdrola [23].

En esta figura podemos ver como el 14% del consumo de energía se utiliza para la climatización de los edificios.

A parte de intentar reducir el consumo de energía, la Unión Europea también ha marcado objetivos para la reducción de las emisiones contaminantes en el ámbito del uso de las energías. Los objetivos marcados por la UE para 2030 son los siguientes:

- Al menos, un 55% menos de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con 1990.

- Al menos, un 32% de energías renovables en el consumo de energía.
- Al menos, un 32,5% de mejora de la eficiencia energética.

El CTE DB-HE 2019[4] en la sección HE 5 “Generación mínima de energía eléctrica procedente de fuentes renovables” nos obliga a cumplir que los edificios de más de 1000 m² de nueva construcción o que se reformen deben cumplir la siguiente cuantificación mínima:

- 1 La **potencia a instalar** mínima P_{\min} será la menor de las resultantes de estas dos expresiones:

$$P_1 = F_{\text{pr,el}} \cdot S$$

$$P_2 = 0,1 \cdot (0,5 \cdot S_c - S_{oc})$$

donde,

P_{\min} potencia a instalar [kW];

$F_{\text{pr,el}}$ factor de producción eléctrica, que toma valor de 0,005 para uso residencial privado y 0,010 para el resto de usos [kW/m²];

S superficie construida del edificio [m²];

S_c superficie de cubierta no transitable o accesible únicamente para conservación [m²]

S_{oc} superficie de cubierta no transitable o accesible únicamente para conservación ocupada por captadores solares térmicos [m²]

Figura 3 Fragmento del CTE DB-HE 2019[4], HE 5.

Para todos estos requisitos las bombas de calor es la solución preferente ya que disponen de un elevado rendimiento y ayudan a reducir las emisiones.

En la siguiente figura podemos ver una comparativa de las emisiones de CO₂ que tienen distintos equipos y podemos apreciar que las bombas de calor presentan bajas emisiones de CO₂ en comparación con las calderas de gasoil y gas natural.

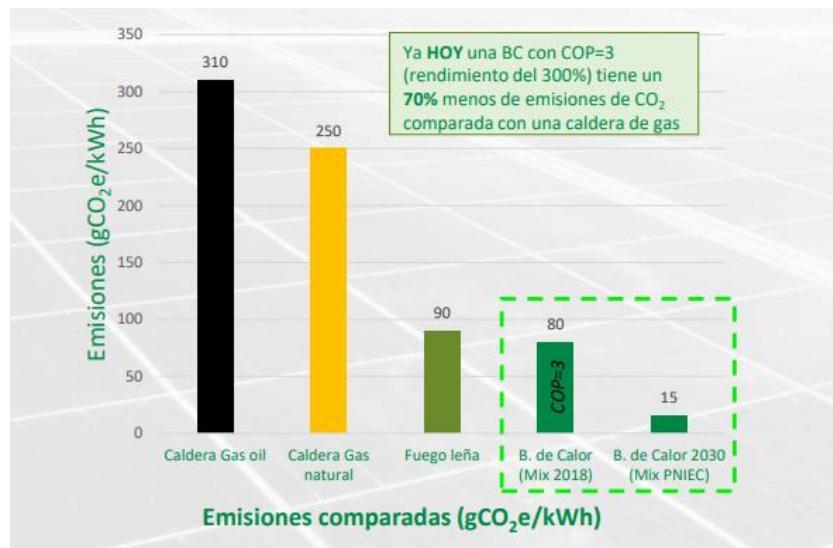


Figura 4 Grafica comparativa de emisiones de CO₂. Estudio realizado con los datos empresa Iberdrola [23].

Además las bombas de calor disponen de COP de entre 3 y 4 (rendimiento del 300-400%), mientras que una caldera de gas tiene un rendimiento entre el 70 y 98%. Siendo energéticamente mucho más eficientes las bombas de calor.

Una vez visto todos los requisitos y obligaciones que impone la normativa actual y viendo los precios de los combustibles y de la energía en la actualidad, he decidido elaborar este trabajo fin de grado con el objetivo de ver las demandas de una vivienda y comprobar cómo se adapta la implementación de una bomba de calor la cual estará hibridada con una caldera de biomasa. Ya que actualmente según las directrices marcadas por la UE, las bombas de calor se presentan como la mejor solución y uno de los objetivos principales del trabajo es comprobar dicha solución con la mejora de introducir una caldera de biomasa. Esto nos permitirá repartir la demanda pico que se produce en invierno y nos evitaremos sobredimensionar la bomba de calor para tan solo unas pocas horas al año. Aparte la caldera podrá cubrir la demanda de calor en periodos de desescarche donde la bomba de calor no puede hacerlo bajo condiciones externas de baja temperatura. Además otro de los objetivos que se abordará será la comparación de las demandas de la vivienda y comprobaremos si es verdad que la evolución de las normativas ha hecho disminuir la demanda de nuestra vivienda.

Para tener una visión general del sistema térmico que hemos mencionado anteriormente, aunque iremos definiendo nuestra instalación equipo a equipo en los siguientes apartados, se puede consultar la Figura 57 “Esquema instalación térmica”.

2. Modelado vivienda unifamiliar

2.1. Metodología

Para la modelización y simulación de mi vivienda unifamiliar voy a hacer uso del programa DesignBuilder. Este programa está especializado en la simulación energética y medioambiental de edificios. Sus prestaciones me permiten evaluar aspectos como los niveles de confort, los consumos de energía y las emisiones de carbono.

Primero voy a presentar las dimensiones que tendrá mi vivienda unifamiliar. Para poder aclarar cuál es el tamaño de los distintos espacios de la casa (salón, baño, cocina, dormitorios). Es importante hacer énfasis en esto, ya que el cálculo de muchos resultados que me ofrece el programa depende del uso que le damos a los espacios habitados. Como puede ser el número de renovaciones de aire. Estas medidas se han establecido después de analizar el documento de Segmentación del parque residencial de viviendas en España en clústeres tipológicos [24].

Tras la definición de las cotas de mi edificio, me voy a centrar en explicar y mostrar los diferentes parámetros energéticos que debo modificar dentro del programa. Así mi edificio puede ser simulado en base a una normativa más o menos reciente.

Para finalizar veré los resultados obtenidos tras simular el edificio con las tres normativas de estudio. Y analizaré como la evolución de la normativa ha aumentado o disminuido la eficiencia de mi edificio. Todo este análisis será ilustrado mediante la confección de una serie de tablas y gráficas que se elaboran desde el propio programa de DesignBuilder.

Durante todo el proceso del modelado se irá acompañando al texto de la memoria con una serie de imágenes que muestren la interfaz del programa DesignBuilder, para poder ilustrar mejor las explicaciones de este apartado y poder ver la interfaz de este programa tan completo.

Pero antes de modelar el edificio lo primero que debo hacer es definir la situación geográfica del edificio, para ello debo introducir dichos datos en la siguiente pestaña:



Figura 5 Interfaz DesignBuilder muestra opciones para introducción datos geográficos.

Si desplego la pestaña de ubicación deberé introducir los datos de longitud, latitud y la zona climática ASHRAE. Una vez introducido los datos correspondientes podré empezar a realizar el modelo de nuestra vivienda unifamiliar.

2.2. Características geométricas vivienda unifamiliar

La geometría desarrollada para mi vivienda unifamiliar consta de las siguientes partes:

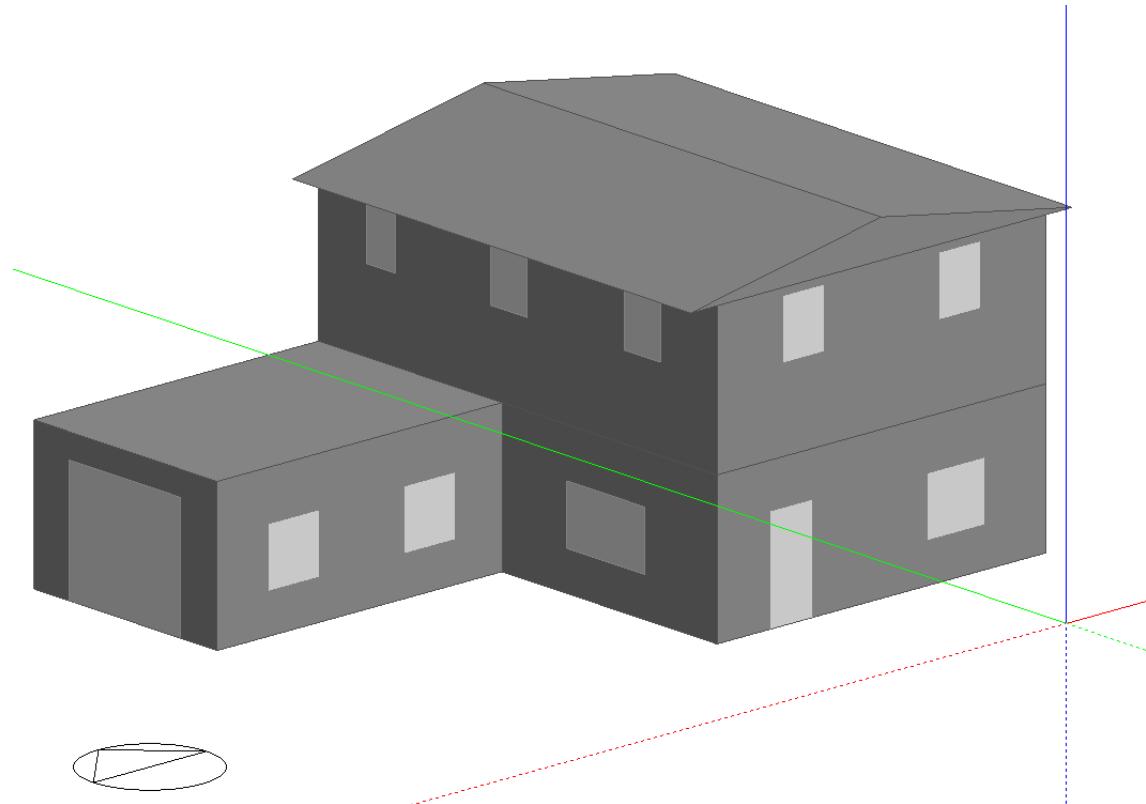


Figura 6 Interfaz DesignBuilder muestra vista 3D Vivienda.

La flecha dentro del círculo nos muestra la dirección del norte, como se ve está alineado con el eje “y” (recta de color verde).

Garaje:

Espacio rectangular de 6,5 m x 4,6 m = 30 m²

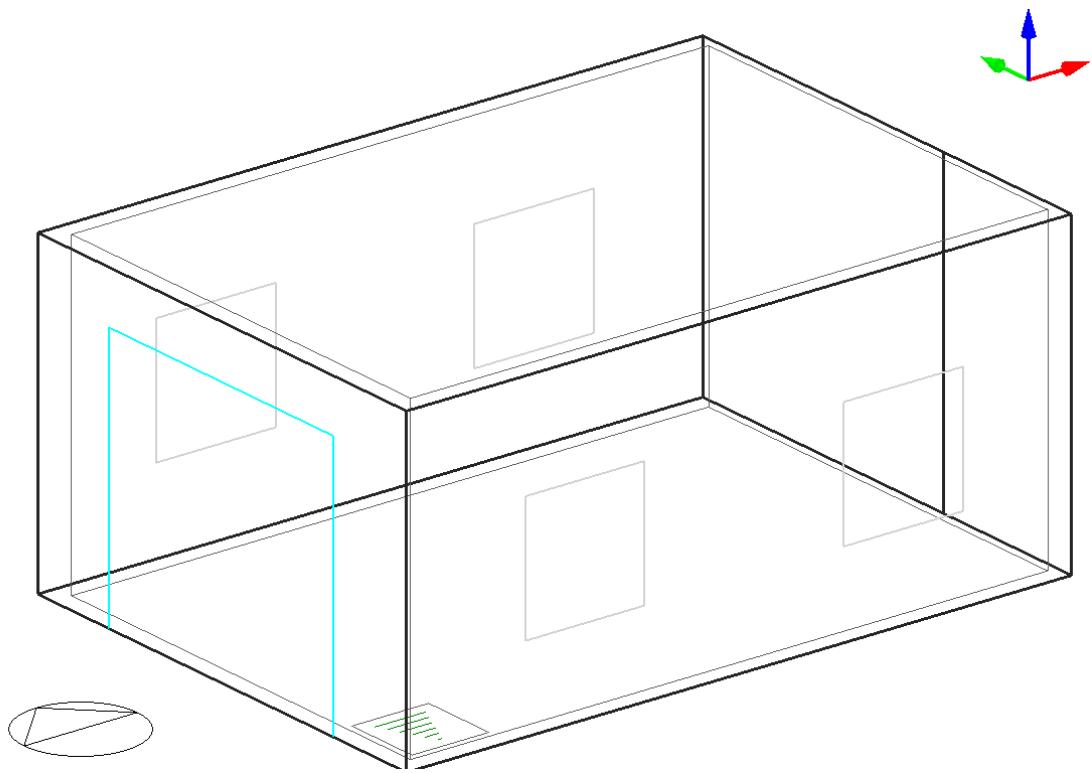


Figura 7 Interfaz DesignBuilder muestra vista Garaje Vivienda.

Planta alta:

Baño: Espacio rectangular de $3,75 \text{ m} \times 3 \text{ m} = 11,25 \text{ m}^2$

Rellano: Espacio rectangular de $3,75 \text{ m} \times 3 \text{ m} = 11,25 \text{ m}^2$

Dormitorio: Espacio rectangular de $7 \text{ m} \times 7,5 \text{ m} = 52,5 \text{ m}^2$

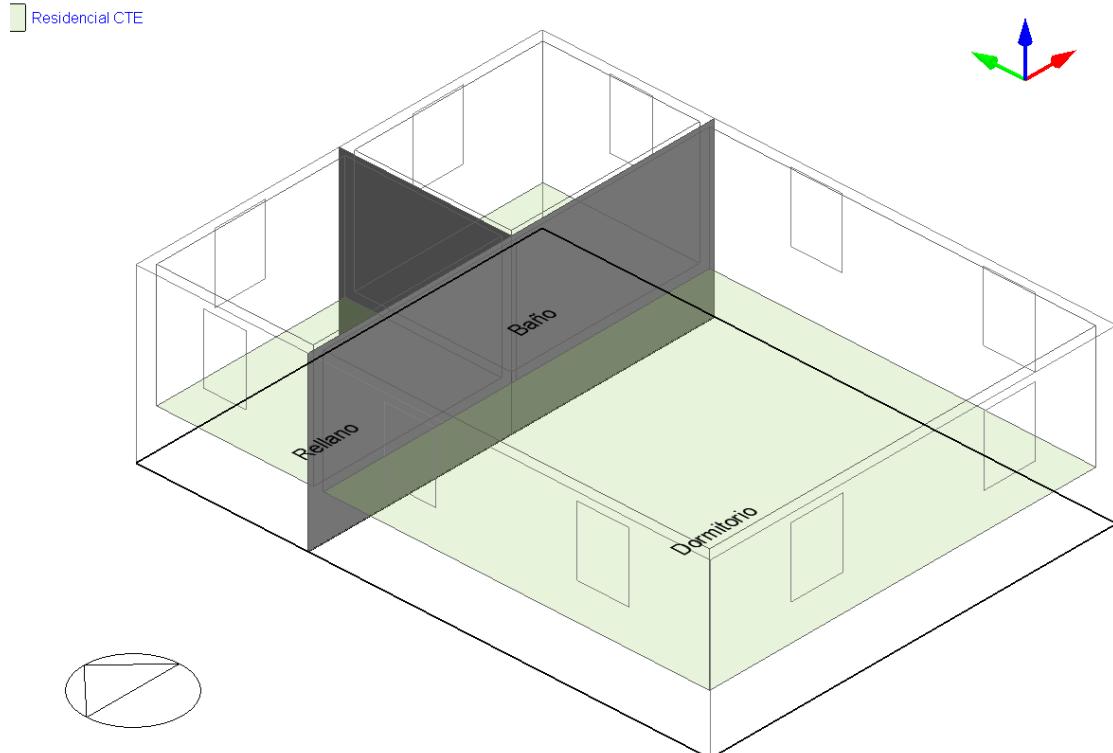


Figura 8 Interfaz DesignBuilder muestra vista Planta Alta Vivienda.

Planta baja:

Cocina: Espacio rectangular de $3\text{ m} \times 7,5\text{ m} = 22,5\text{ m}^2$

Salón: Espacio rectangular de $7\text{ m} \times 7,5\text{ m} = 52,5\text{ m}^2$

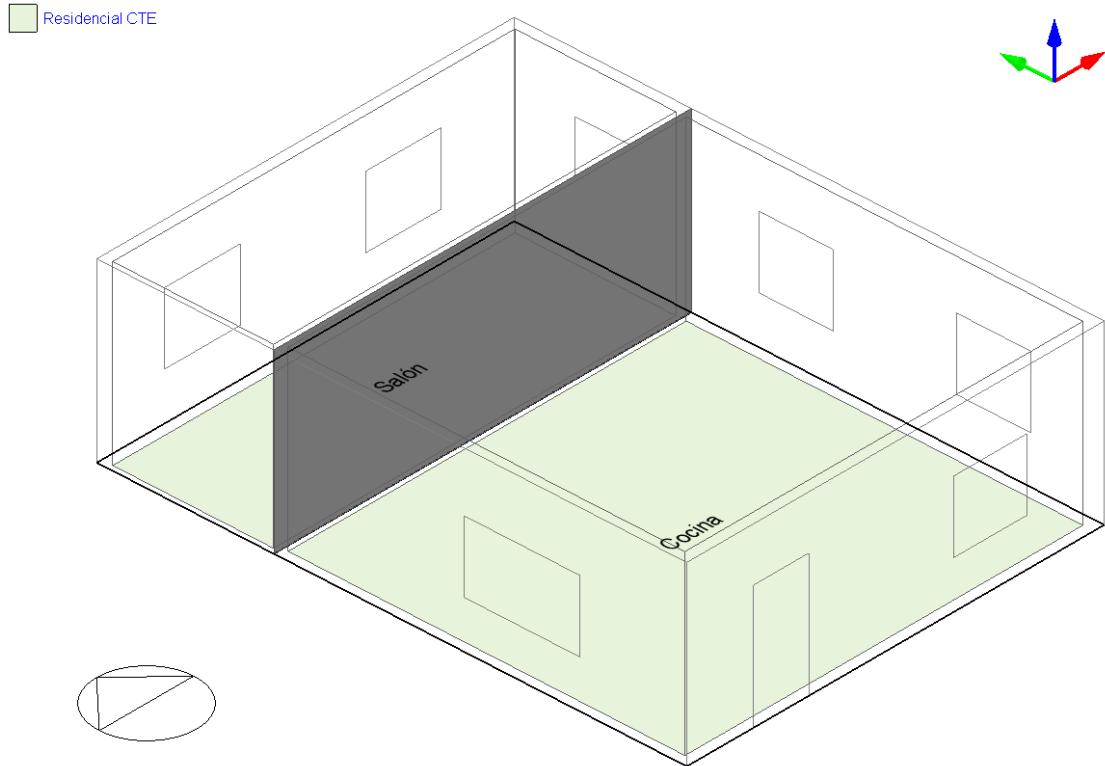


Figura 9 Interfaz DesignBuilder muestra vista Planta Baja Vivienda.

Cubierta:

Espacio no habitable que tiene una altura de 0,6 m y ligeramente inclinada.

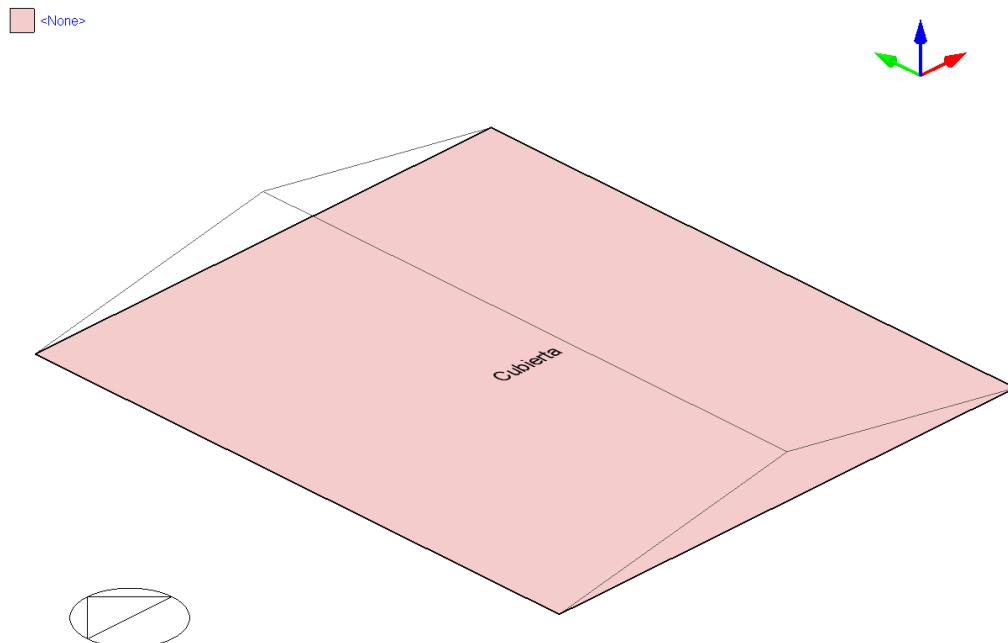


Figura 10 Interfaz DesignBuilder muestra vista Cubierta Vivienda.

Una vez he realizado las particiones de los edificios, debo asignar a cada una de estas particiones una plantilla de actividad. Para ello debo crear una nueva y poner los valores que nos marca el CTE. Como veremos en la siguiente figura a estas plantillas las he designado por el nombre de “Residencial CTE” y al tiempo de programación “Residencial CTE Ocupación”.

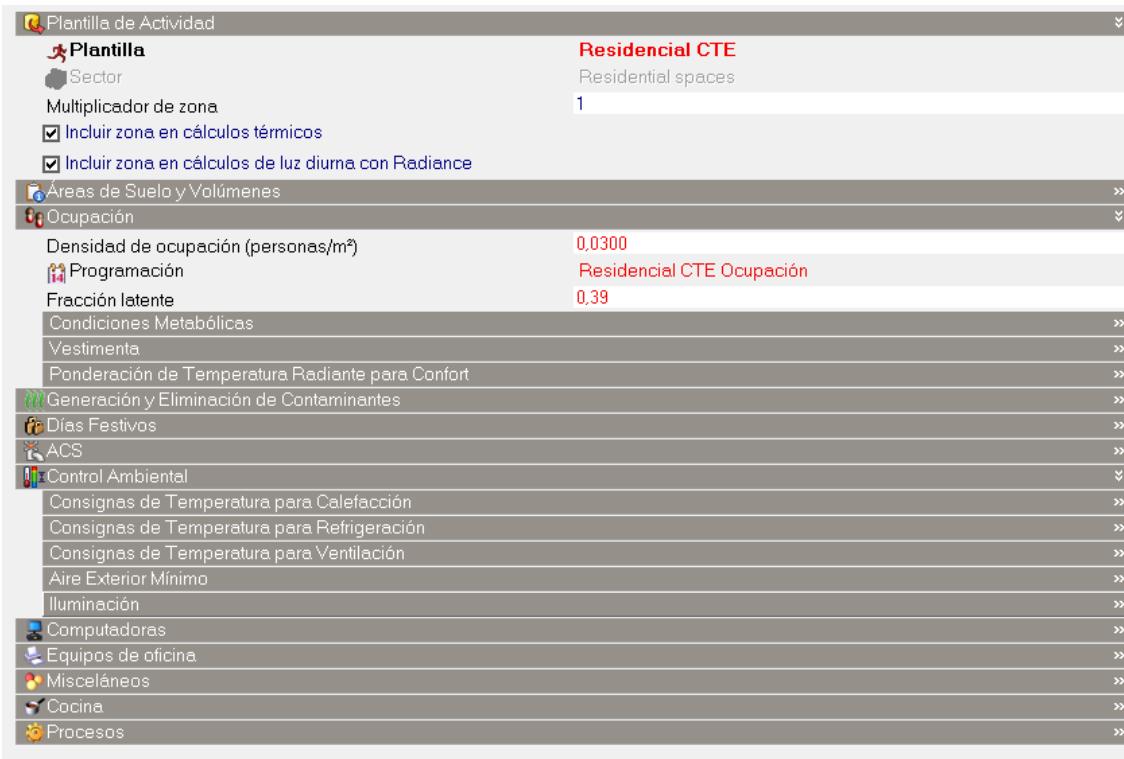


Figura 11 Interfaz DesignBuilder muestra Actividad edificio.

Con esto quedaría definida la actividad de los espacios habitables de nuestro edificio. Y para los espacios no habitables de mi edificio como puede ser la cubierta, debo ir nuevamente a la pestaña de actividad y poner en la plantilla de actividad <None>. Y así indico que en ese espacio no se va a realizar ninguna actividad ya que no van a estar personas ahí a ninguna hora del día.

Una vez definida la geometría de mi vivienda voy a pasar a definir la geometría de mis aberturas (en mi caso consiste en ventanas y puertas). En mi vivienda se ha decidido imponer como diseño los siguientes parámetros para el diseño de ventanas:

- Un 15% de superficie de ventanas en todas las orientaciones de las fachadas.
- Altura de todas las ventanas=1,2 m.
- Espaciado entre ventanas=3 m.
- Altura del alfeizar=0,8 m.

Estos parámetros los voy a trasladar a DesignBuilder en la pestaña aberturas:

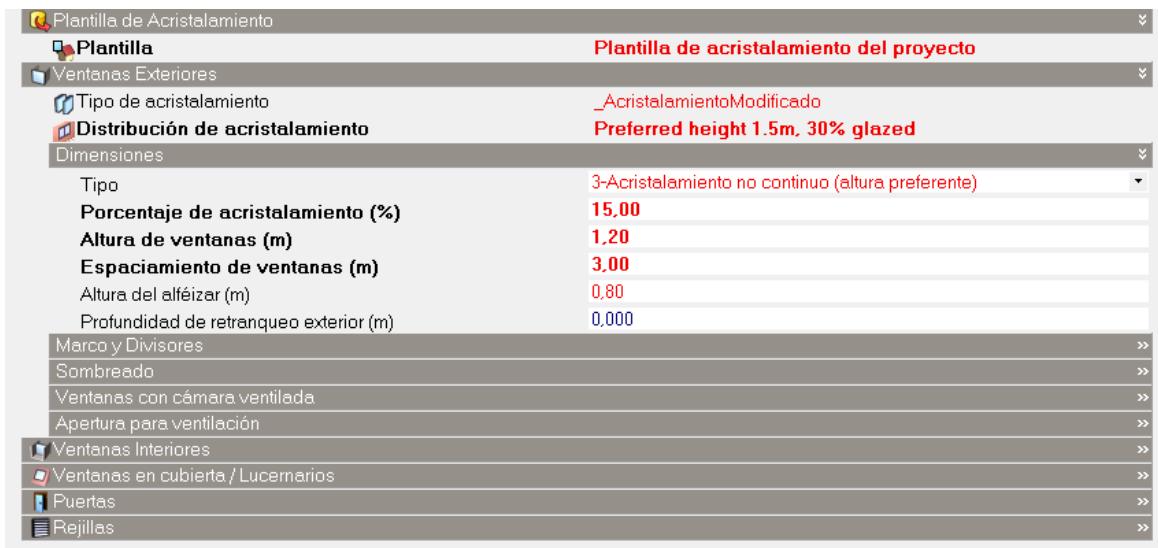


Figura 12 Interfaz DesignBuilder muestra Aberturas edificio.

Y para finalizar con las aberturas voy a definir la geometría de mis puertas. En total hay dos:

La puerta de garaje/almacén tiene una dimensión de 2,8 m x 2,5 m.

Y la puerta de entrada a la vivienda de 1 m x 2,1 m.

2.3. Parámetros energéticos impuestos por la normativa

2.3.1. Valores límite de transmitancia

Tras haber definido los bloques de edificio con la geometría deseada debo cambiar los coeficientes de transmitancia térmica, ya que nos vienen unos por defecto que no se corresponden con lo que marca la normativa. Cabe remarcar que antes de 1979 no había exigencias en la normativa por lo que se podía suponer un valor de $U=2,5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ para todos los cerramientos opacos en cualquier zona climática.

A partir de 1979 ya se impuso en la normativa que dependiendo de la zona climática en donde se situara el edificio, debía de haber unos coeficientes de transmitancia dependiendo el tipo de cerramiento. Teruel capital por su altitud (915 m) se corresponde según CTE con la zona climática D2.

Para llevar a cabo la modificación de los cerramientos para las distintas normativas voy a utilizar las tablas que se recogen en los siguientes anexos:

-1.1. Valores límite de transmitancia.

-1.2. Soluciones constructivas.

Lo primero que tengo que hacer es crear un nuevo cerramiento en DesignBuilder con las soluciones constructivas que se recoge en el anexo 1.2. Como se puede apreciar los

cerramientos están compuestos por distintas capas, por lo que tendré que ir definiendo para cada cerramiento las propiedades de cada capa. En este caso la interfaz del programa de DesignBuilder me exige los datos de espesor de cada capa (mm), conductividad (W/m K), densidad (kg/m³) y calor específico (J/kg K). Para poder establecer el coeficiente de transmitancia que deseo para las distintas versiones de la normativa y para los distintos cerramientos, lo que voy a hacer es dejar uno de los espesores de todos los cerramientos de tamaño variable (en mi caso el material con espesor variable es EPS Poliestireno Expandido, es el material aislante de mi cerramiento). Con esto podré introducir el valor de “U” al cerramiento que desee y automáticamente ese espesor variable se ajustará al valor necesario para conseguir el coeficiente de transmitancia que he introducido.

Los valores de transmitancia para los distintos cerramientos con los que cuenta mi vivienda unifamiliar y la diferencia que existe para las distintas versiones de la normativa se encuentran expresados en el anexo seis, “Valores de transmitancia para los Cerramientos según distintas versiones de la normativa”.



Figura 13 Interfaz DesignBuilder muestra Cerramientos modificados edificio.

Estos son los cerramientos que debo modificar en mi edificio para las tres versiones de la normativa que estoy analizando.

2.3.2. Permeabilidad de los huecos

Los huecos se refieren al conjunto de vidrio y su carpintería. Para poder definir la permeabilidad de mis huecos en DesignBuilder debo introducir el dato de transmitancia térmica “U” y el factor solar “g” en tanto por uno.

En las tablas 13, 14 y 15 de los anexos podemos encontrar el valor de dichos parámetros para las distintas normativas. Siendo los siguientes:

Normativa	U (W/m ² K)	g
NBE-CT-1979	5,8	0,77
CTE DB-HE 2006	3,5	0,70
CTE DB-HE 2019	1,8	0,60

Figura 14 Tabla valores permeabilidad huecos distintas normativas.

2.3.3. Relación del cambio de aire

La relación del cambio de aire (n_{50}) es un parámetro que se introduce con el CTE DB-HE 2019[4], por lo que no aparecen limitaciones en la normativa precedente.

El valor de la relación del cambio de aire considerando una presión diferencial de 50 Pa puede calcularse a partir de la siguiente expresión:

$$n_{50} = 0,625 \cdot (C_0 \cdot A_0 + C_h \cdot A_h) / V$$

Cada uno de los términos de la ecuación está explicado en el Anexo 2.2.

Si vamos a la tabla a-Anejo H, CTE DB-HE 2019[4], podemos ver que el coeficiente C_0 es igual para las tres normativas y es de $16 \text{ m}^3/\text{h m}^2$ expresado para 100 Pa. Ya que consideramos que nuestro edificio es de nueva construcción.

Las áreas y volúmenes corresponden a la geometría del edificio siendo las siguientes:

$$A_0 = 239,25 \text{ m}^2$$

$$A_h = 37,35 \text{ m}^2$$

$$V = 539,7 \text{ m}^3$$

Mientras que los valores de C_h para las distintas normativas están recogidos en la tabla 16 del anexo 2.1.

Esto nos da lugar a los siguientes resultados:

Normativa	n_{50}
NBE-CT-1979	5,64
CTE DB-HE 2006	5,64
CTE DB-HE 2019	4,85

Figura 15 Tabla valores relación cambio de aire distintas normativas.

2.3.4. Ventilación mecánica

Además de las infiltraciones incontroladas calculadas en el apartado anterior, otro parámetro de entrada al software que influye en la demanda energética del edificio, es la renovación contralada del aire debida a la ventilación de los espacios.

El caudal mínimo de ventilación exigido en cada normativa se define en el Documento Básico HS Salubridad, en la Sección HS 3: Calidad del aire interior. Anteriormente a la entrada en vigor del CTE, no existía dicha exigencia. Por ello, en el caso del periodo de construcción 1981-2007, se podrían aplicar los valores del CTE-DB-HS 2006[3]. Para el resto de los periodos de construcción considerados, se toman los valores mínimos de ventilación establecidos en el CTE-DB-HS 2017[6] que coinciden con los del CTE-DB-HS 2019[4].

En la simulación de todos los casos de estudio se considera ventilación nocturna en verano (junio a septiembre) de 4 ren/h.

Para calcular el número de ren/h debemos de tener en consideración cuales son los espacios que hay en nuestra vivienda y que actividad se le da a cada espacio. Ya que dependiendo de si una habitación es una cocina o un baño tendrá un caudal mayor o menor de ventilación (l/s). Estos caudales se indican en la normativa anteriormente mencionada.

Para pasar de un caudal (l/s) a ren/h debemos de multiplicar por 3600, luego dividir para 1000 y por último dividir por el Volumen de la envolvente.

Esto nos da los siguientes resultados:

Normativa	Ventilación mecánica (ren/h)
NBE-CT-1979	0,40
CTE DB-HE 2006	0,28
CTE DB-HE 2019	0,22

Figura 16 Tabla valores ventilación mecánica distintas normativas.

2.3.5. Puentes térmicos

Los puentes térmicos no poseen un valor límite como tal en las diferentes normativas, ya que dependen de la composición de los elementos que los constituyen y de la longitud del encuentro entre los mismos, sin embargo, tienen un peso significativo en la transmitancia global del edificio y, por tanto, en su demanda energética.

Los valores de los distintos puentes térmicos introducidos en DesignBuilder se obtienen según el Documento de Apoyo DA DB-HE 3 Puentes térmicos, del Código Técnico de la Edificación.

El software calcula la longitud de los puentes térmicos en base a las dimensiones externas, por lo que se deben introducir los valores de Ψ_e que aparecen en el citado documento de apoyo. Con el fin de obtener unos valores realistas a los casos de estudio,

se extraña o interpola, según sea necesario, sobre los datos indicados en el documento de apoyo. En el anexo 4, se muestran los valores obtenidos para cada junta de los diferentes elementos constructivos del edificio según el periodo de construcción y el clima.

Si lo traspasamos a DesignBuilder para las distintas normativas tendríamos la siguiente interfaz:

-CTE DB-HE 2019[4]

Valores Psi Cuando NO Hay Revestimiento Metálico	
Cubierta-Muro (W/m-K)	0,060
Muro-Suelo sobre terreno (W/m-K)	0,009
Muro-Muro (esquina) (W/m-K)	-0,130
Muro-Suelo interior (W/m-K)	0,104
Muro-Suelo exterior (W/m-K)	0,007
Dintel sobre ventana o puerta (W/m-K)	0,104
Alféizar bajo ventana (W/m-K)	0,087
Jamba de ventana o puerta (W/m-K)	0,017

Figura 17 Interfaz DesignBuilder muestra valores puentes térmicos CTE DB-HE 2019[4].

-CTE DB-HE 2006[3]

Valores Psi Cuando NO Hay Revestimiento Metálico	
Cubierta-Muro (W/m-K)	0,025
Muro-Suelo sobre terreno (W/m-K)	-0,050
Muro-Muro (esquina) (W/m-K)	-0,280
Muro-Suelo interior (W/m-K)	0,123
Muro-Suelo exterior (W/m-K)	0,023
Dintel sobre ventana o puerta (W/m-K)	0,123
Alféizar bajo ventana (W/m-K)	0,123
Jamba de ventana o puerta (W/m-K)	0,140

Figura 18 Interfaz DesignBuilder muestra valores puentes térmicos CTE DB-HE 2006[3].

-NBE-CT-1979[1]

Valores Psi Cuando NO Hay Revestimiento Metálico	
Cubierta-Muro (W/m-K)	0,020
Muro-Suelo sobre terreno (W/m-K)	-0,050
Muro-Muro (esquina) (W/m-K)	-0,500
Muro-Suelo interior (W/m-K)	0,450
Muro-Suelo exterior (W/m-K)	0,020
Dintel sobre ventana o puerta (W/m-K)	0,450
Alféizar bajo ventana (W/m-K)	0,130
Jamba de ventana o puerta (W/m-K)	0,450

Figura 19 Interfaz DesignBuilder muestra valores puentes térmicos NBE-CT-1979[1].

2.3.6. Demanda ACS

El último factor que debo de modificar es la demanda de ACS para ello debo de ir al anexo F, CTE DB-HE 2019[4], en donde se nos explica de manera detallada como calcular la demanda en l/día. No obstante DesignBuilder exige que este dato se introduzca en las siguientes unidades l/m² día.

En mi caso mi vivienda unifamiliar cuenta con un único dormitorio por lo que esto equivale a un total de 1,5 personas. La demanda de ACS sería igual a 42 l/día (1,5*28). Y para terminar dividimos los 42 l/día por el área útil de la casa que en total son 180 m². El resultado de la demanda de ACS es de 0,233 l/m² día.

2.3.7. Análisis de resultados

Una vez finalizado el modelado de la vivienda unifamiliar para las tres normativas, DesignBuilder nos permite hacer simulaciones muy completas en distintos periodos de tiempo.

La simulación de DesignBuilder nos permite conocer resultados como datos climáticos, datos de confort, ganancias internas, cerramientos y ventilación, consumos desglosados, consumos totales, emisiones de CO₂, cargas del sistema...

El tiempo de la simulación puede durar un año o varios años y podemos dividir ese intervalo de tiempo de manera mensual, diaria e incluso horaria.

Voy a centrarme en analizar y comparar la demanda y consumo de refrigeración y calefacción que tiene nuestra vivienda para distintas normativas. Siendo el periodo de simulación establecido de un año natural y dividido en distintos intervalos de tiempo (anual, mensual y horario). A continuación se muestran dichos resultados:

Demandas CTE DB-HE 2019[4]:

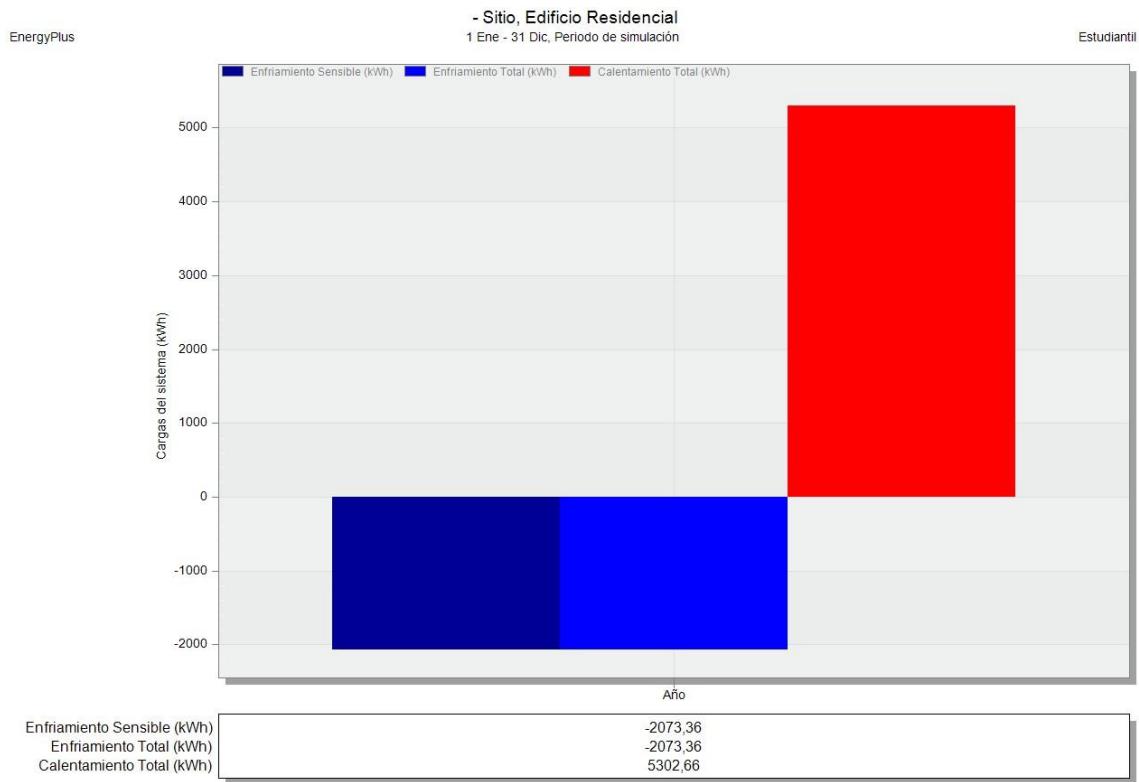


Figura 20 Gráfica Demanda anual CTE DB-HE 2019[4].

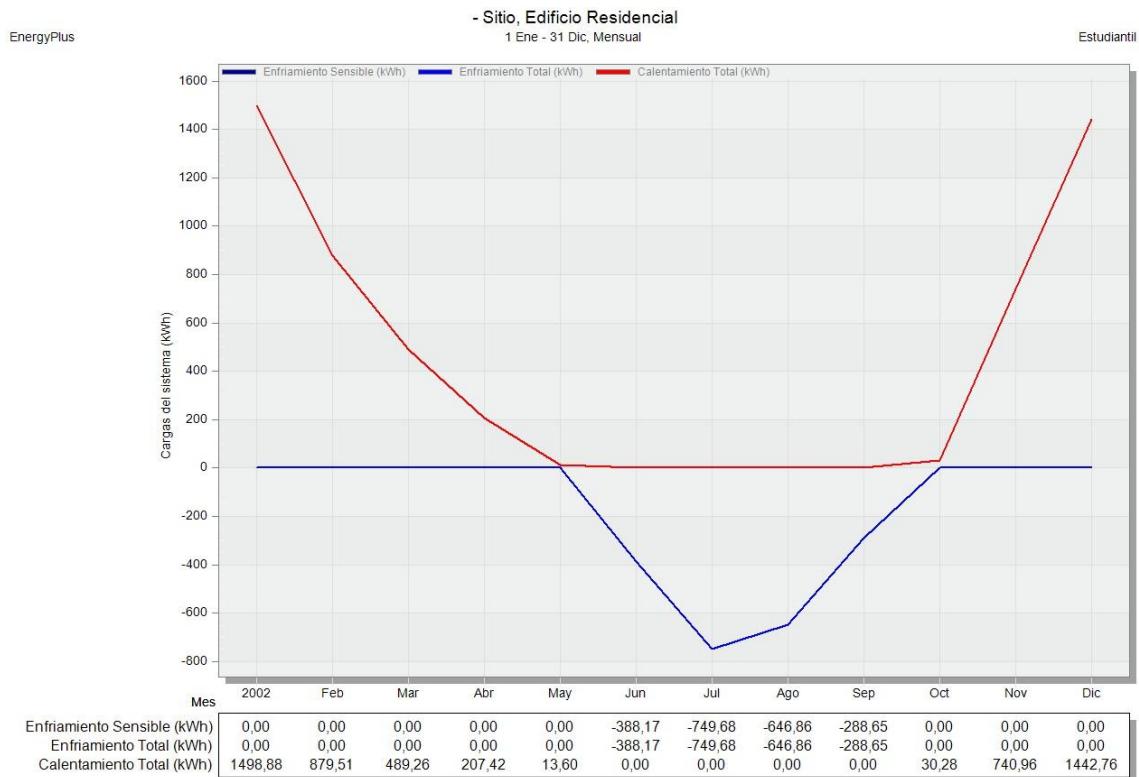


Figura 21 Gráfica Demanda mensual CTE DB-HE 2019[4].

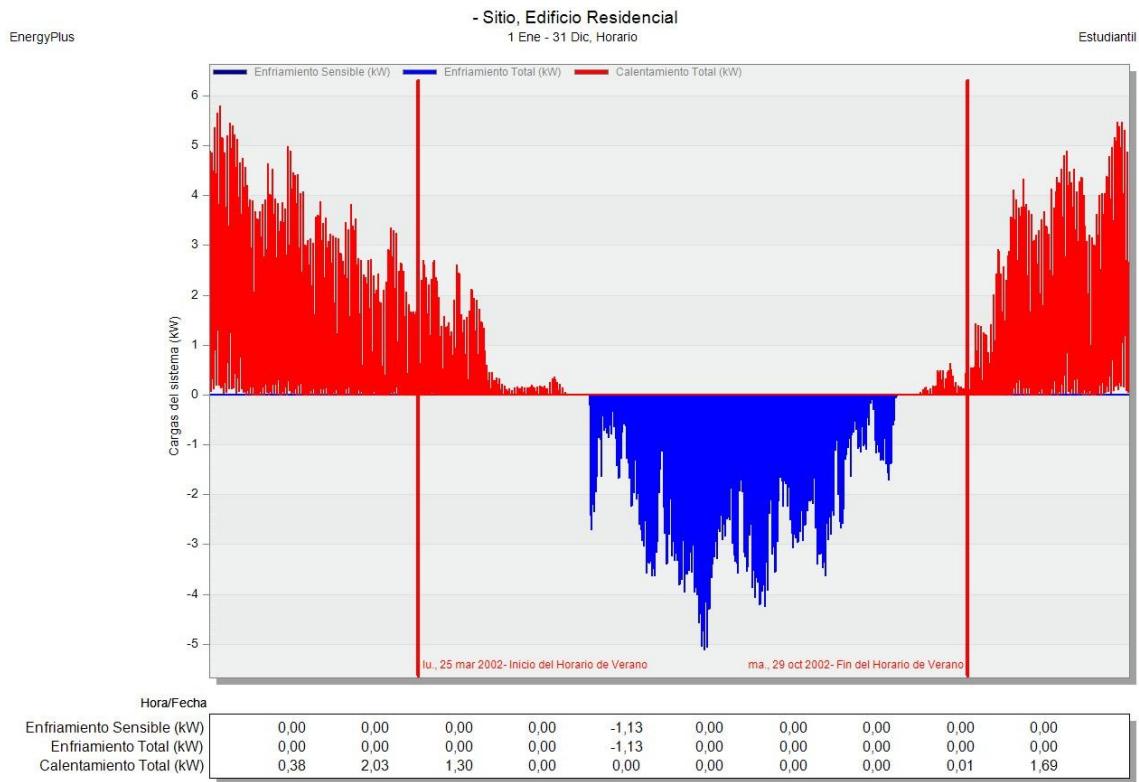


Figura 22 Gráfica Demanda horaria CTE DB-HE 2019[4].

Consumo CTE DB-HE 2019(4):

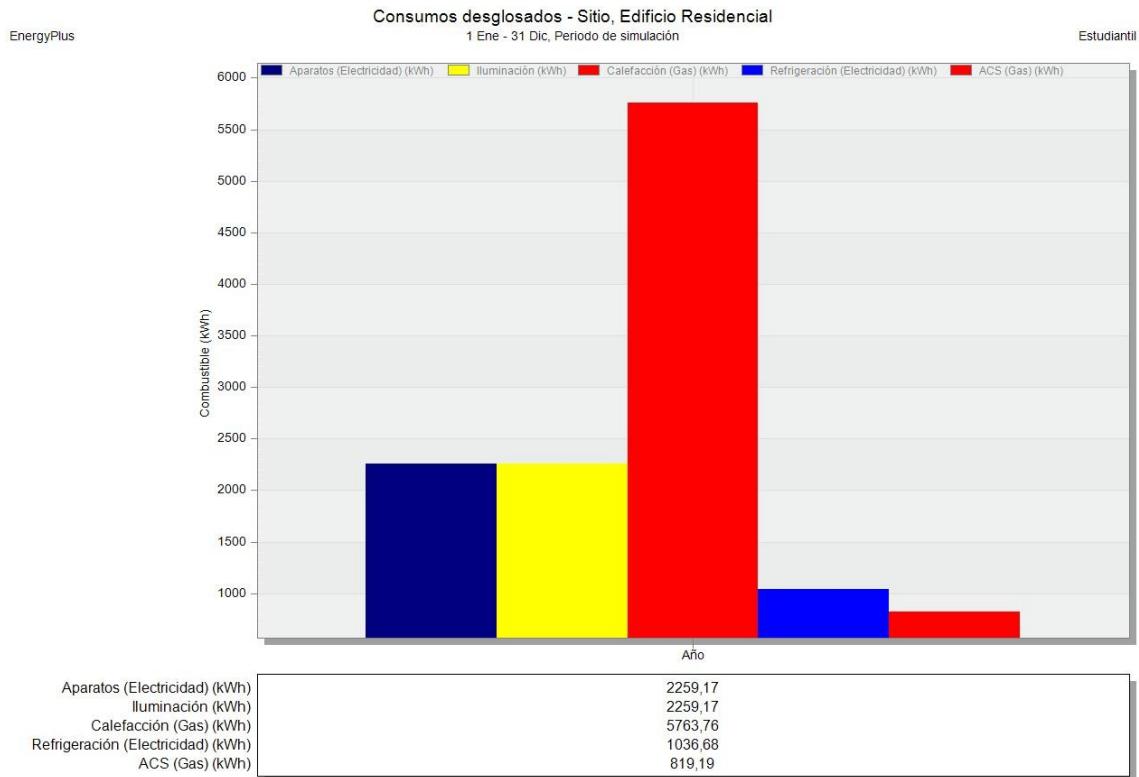


Figura 23 Gráfica Consumo anual CTE DB-HE 2019[4].

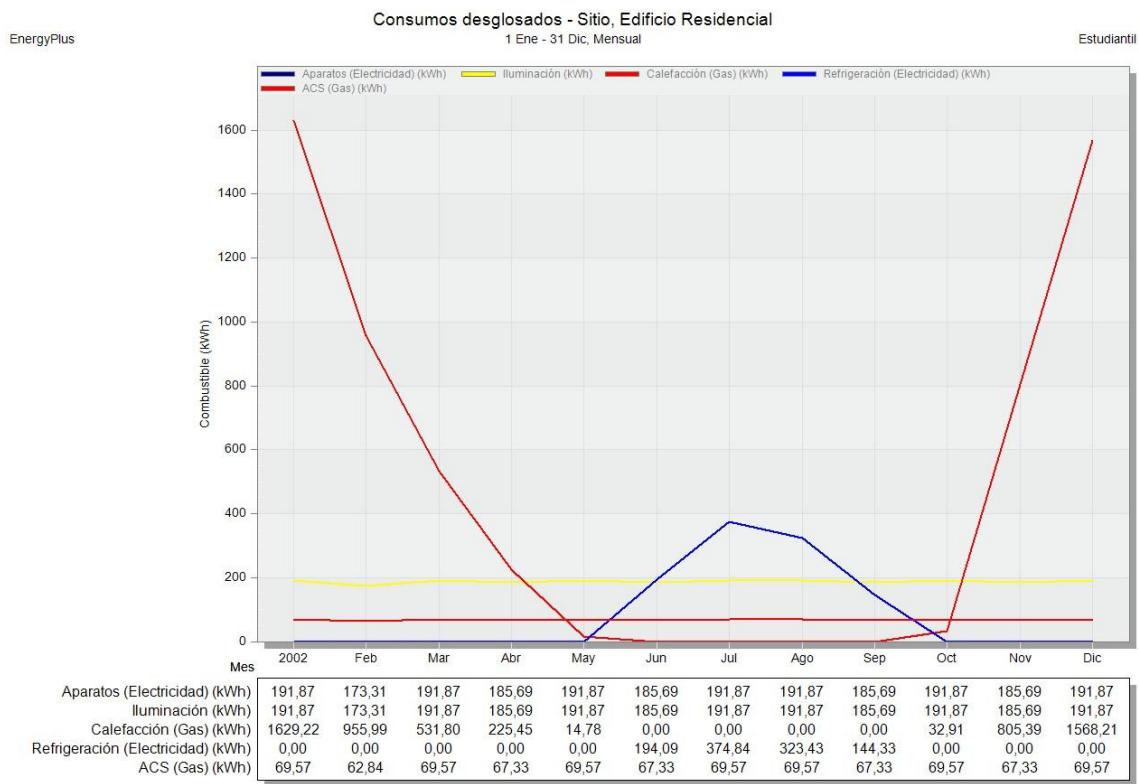


Figura 24 Gráfica Consumo mensual CTE DB-HE 2019[4].

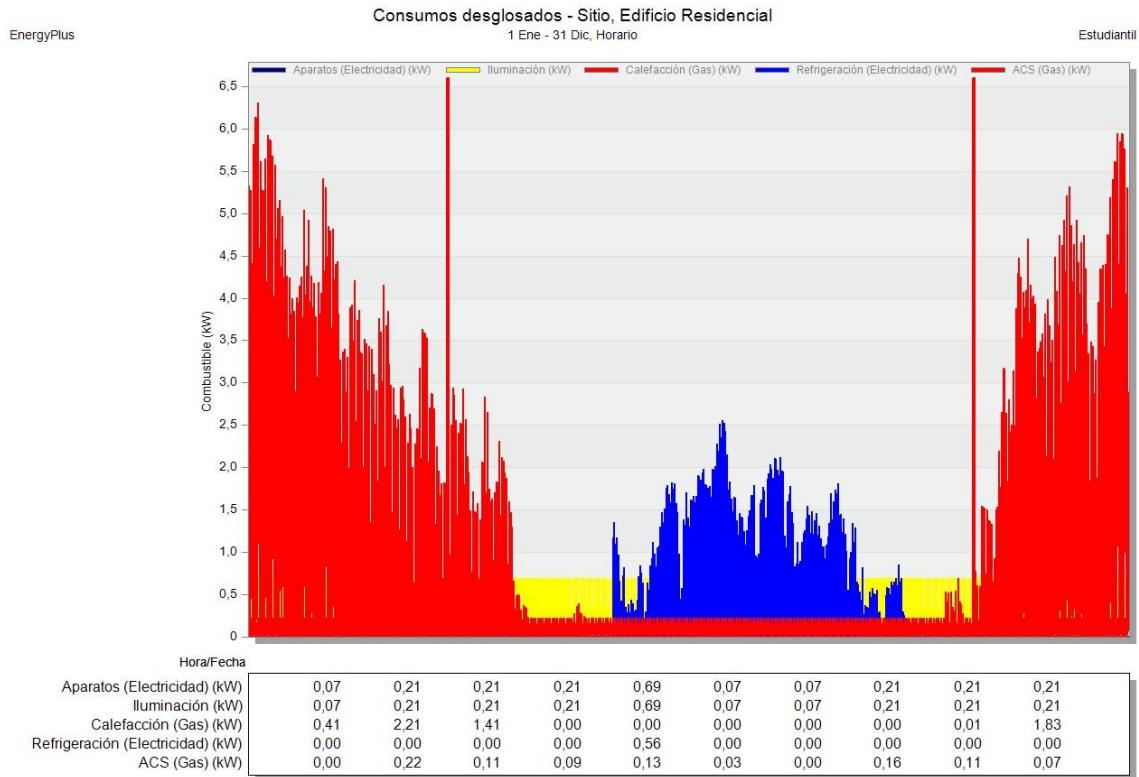


Figura 25 Gráfica Consumo horario CTE DB-HE 2019[4].

Demanda CTE DB-HE 2006(3):

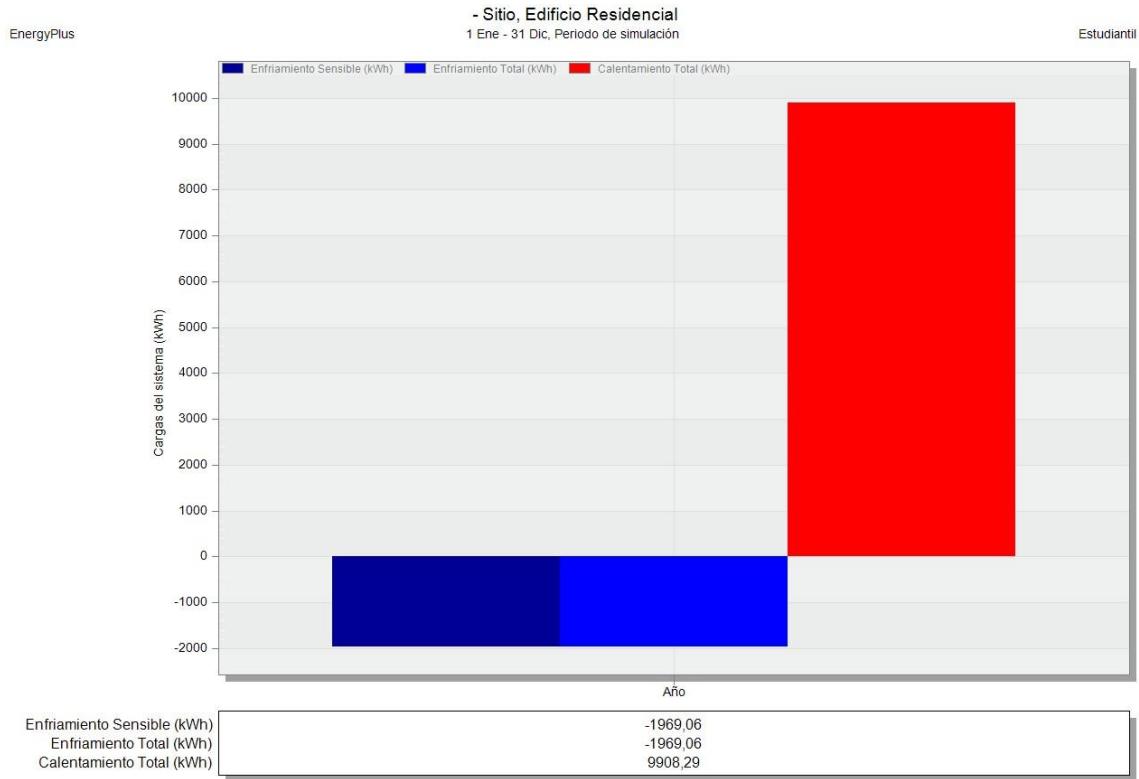


Figura 26 Gráfica Demanda anual CTE DB-HE 2006[3].

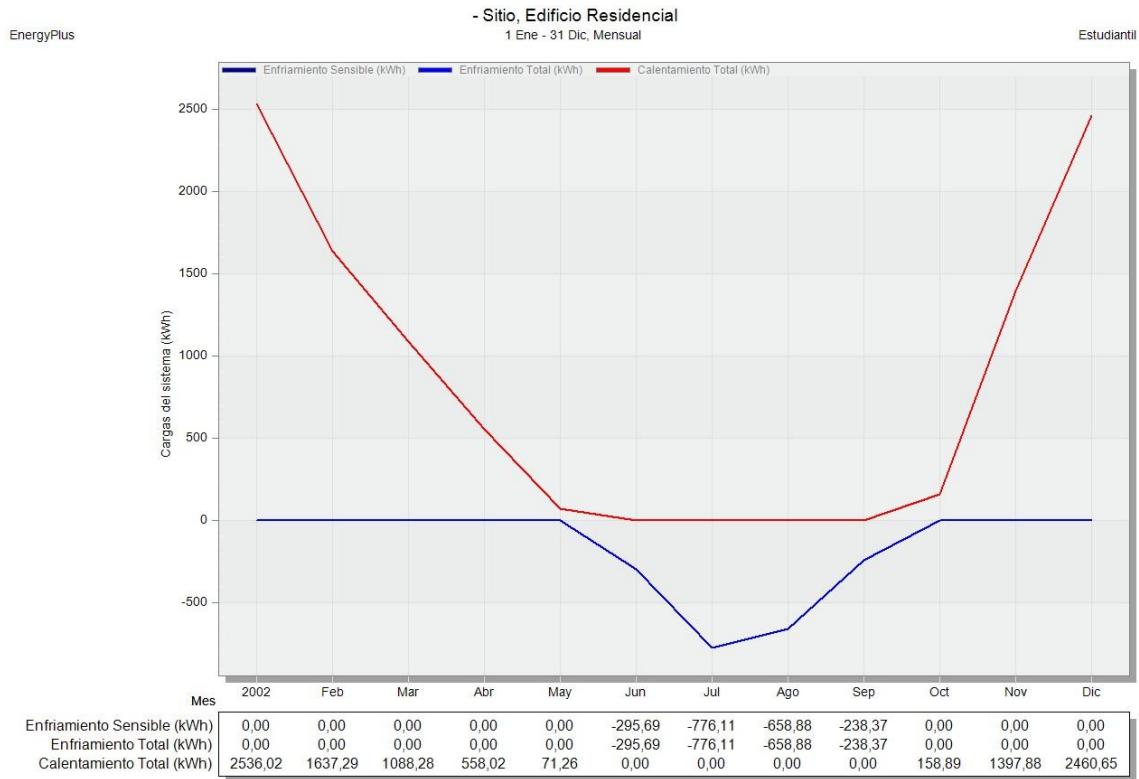


Figura 27 Gráfica Demanda mensual CTE DB-HE 2006[3].

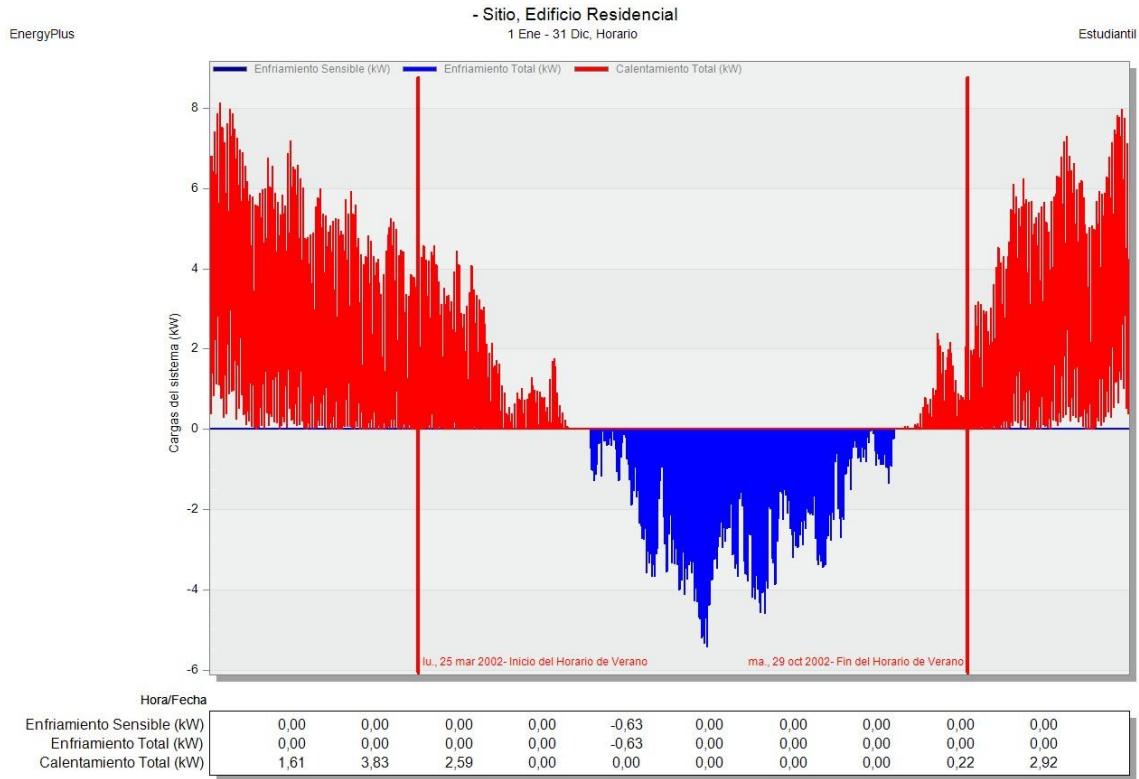


Figura 28 Gráfica Demanda horaria CTE DB-HE 2006[3].

Consumo CTE DB-HE 2006(3):

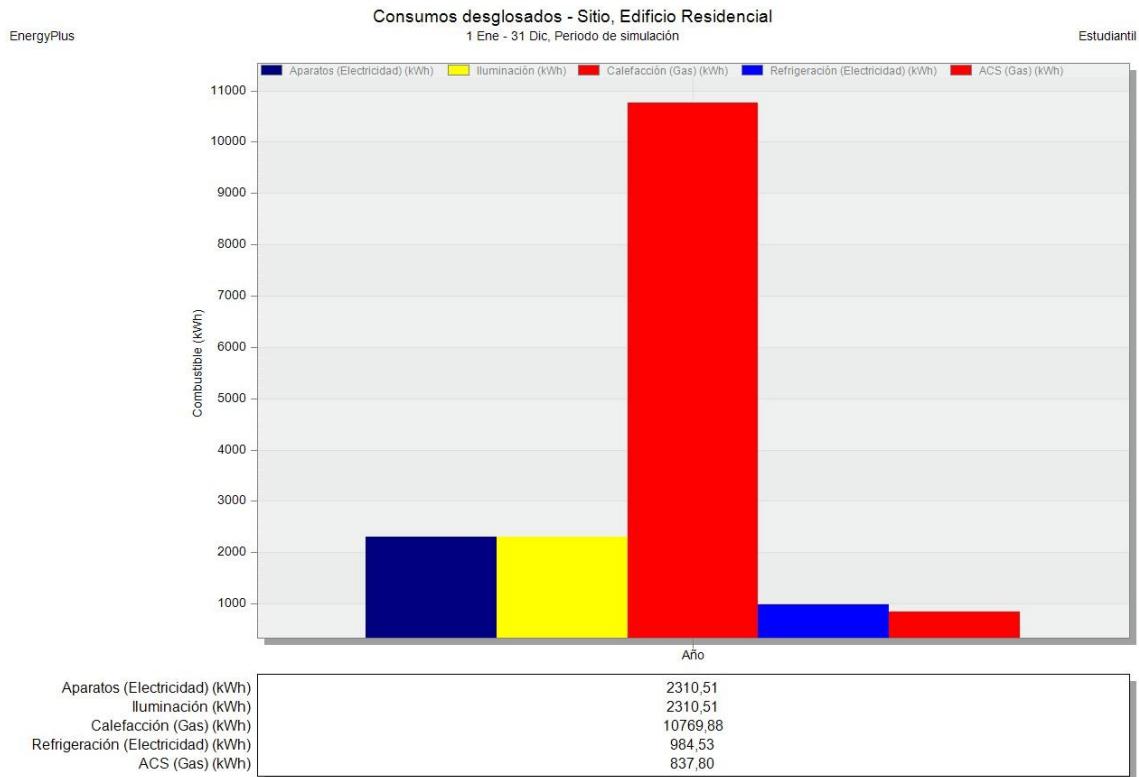


Figura 29 Gráfica Consumo anual CTE DB-HE 2006[3].

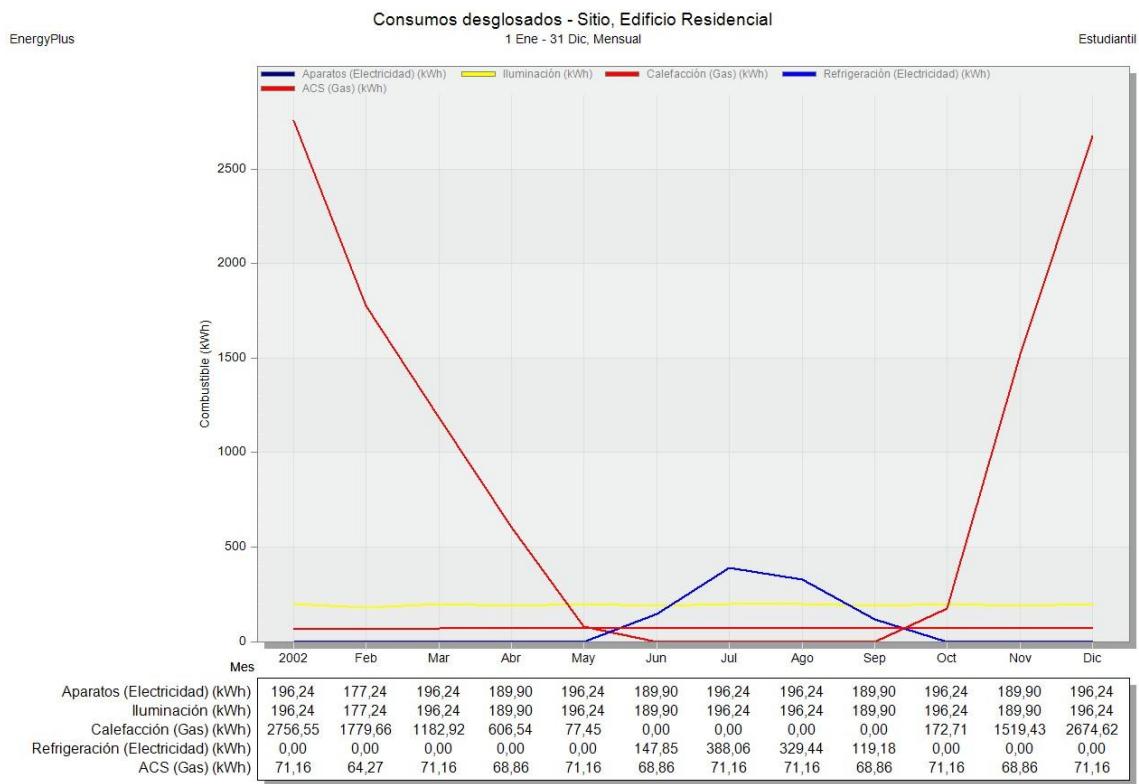


Figura 30 Gráfica Consumo mensual CTE DB-HE 2006[3].

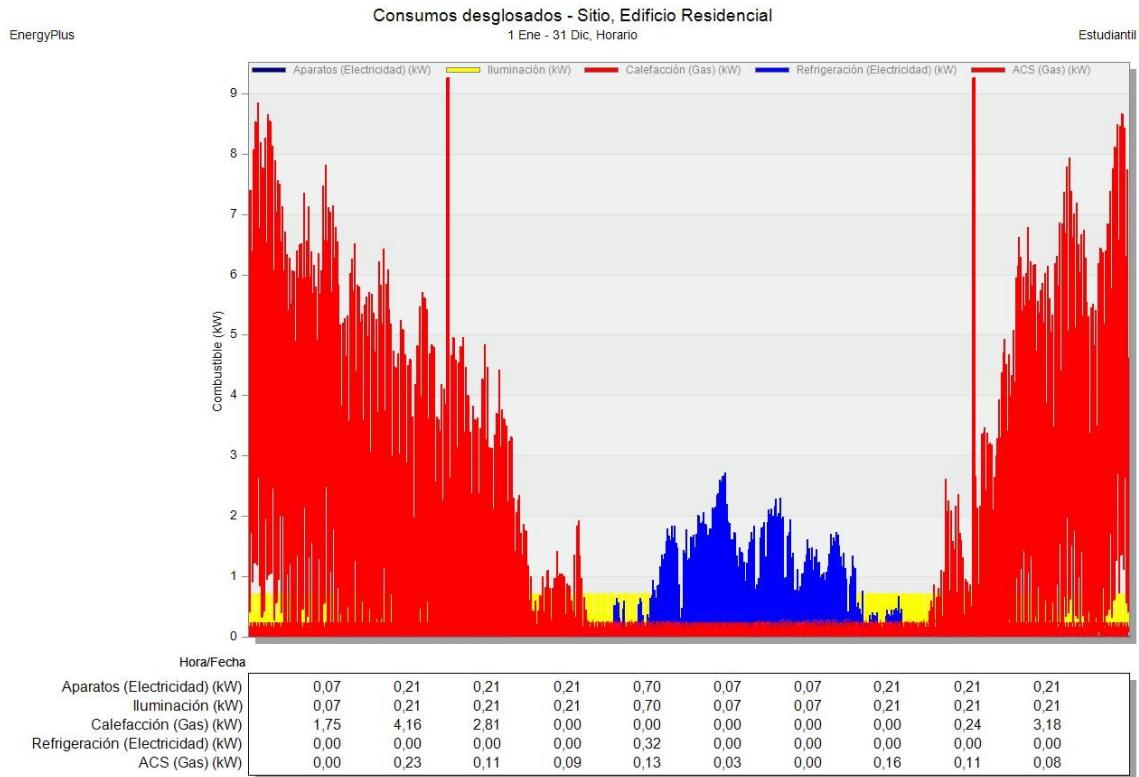


Figura 31 Gráfica Consumo horario CTE DB-HE 2006[3].

Demanda NBE-CT-1979(1):

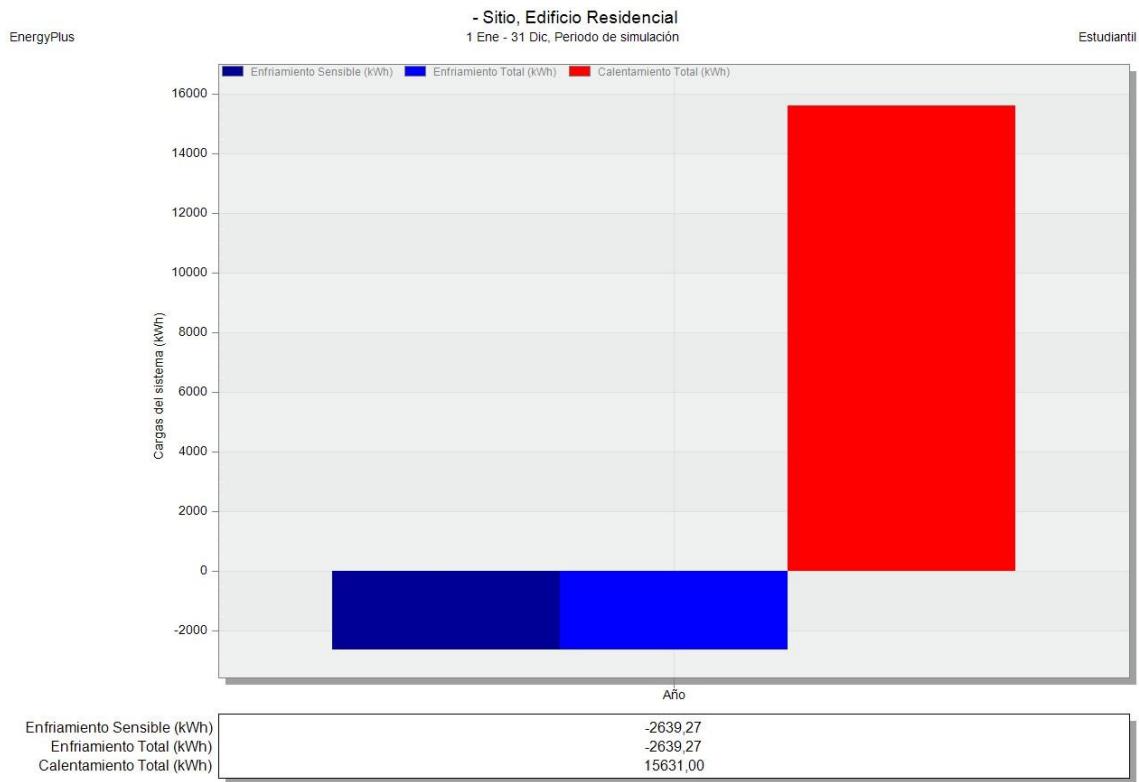


Figura 32 Gráfica Demanda anual NBE-CT-1979[1].

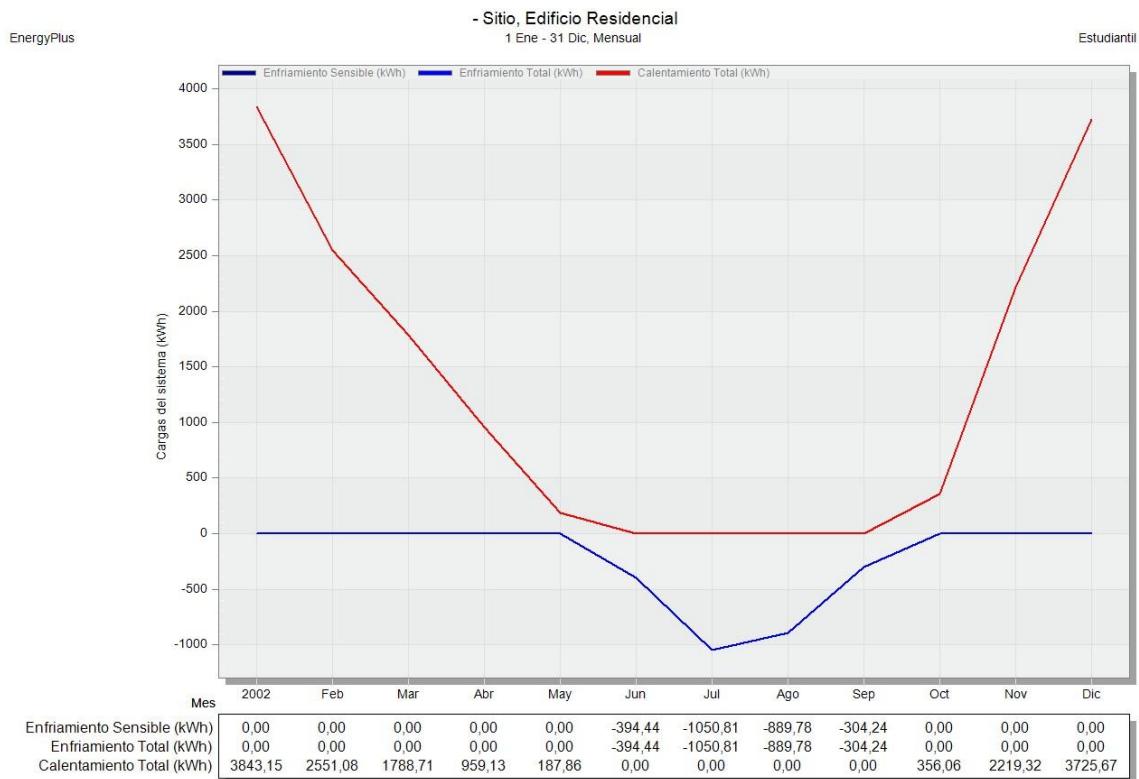


Figura 33 Gráfica Demanda mensual NBE-CT-1979[1].

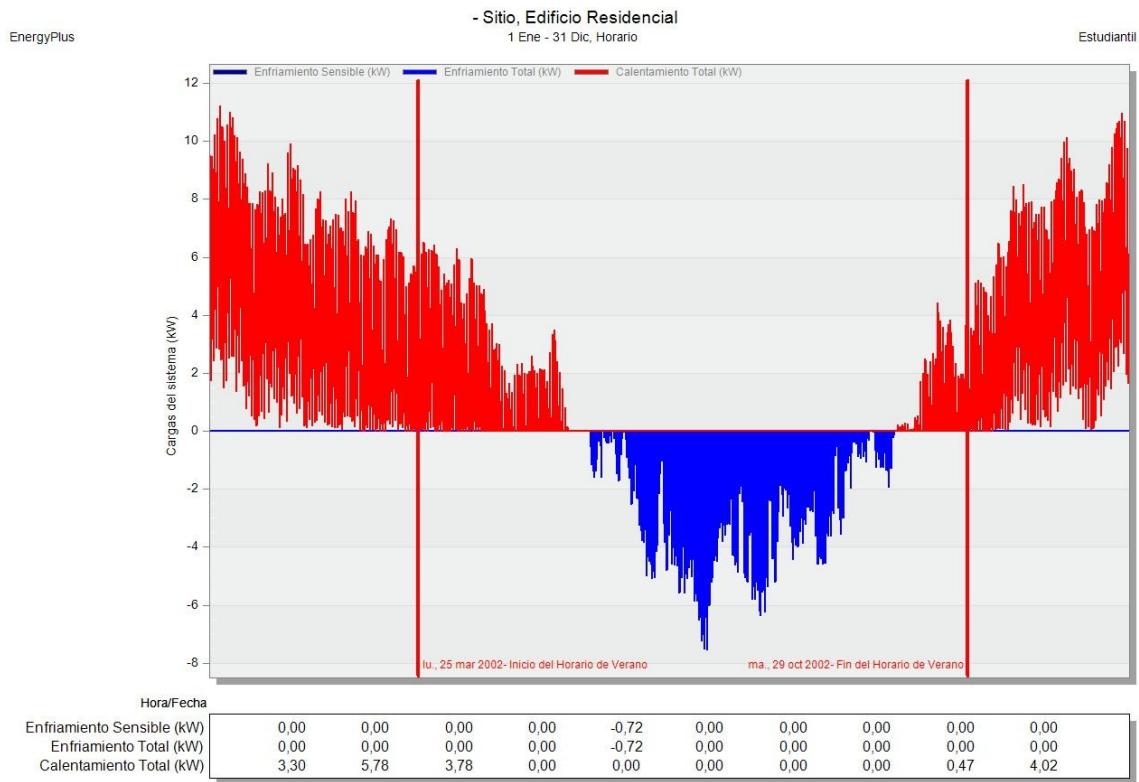


Figura 34 Gráfica Demanda horaria NBE-CT-1979[1].

Consumo NBE-CT-1979(1):

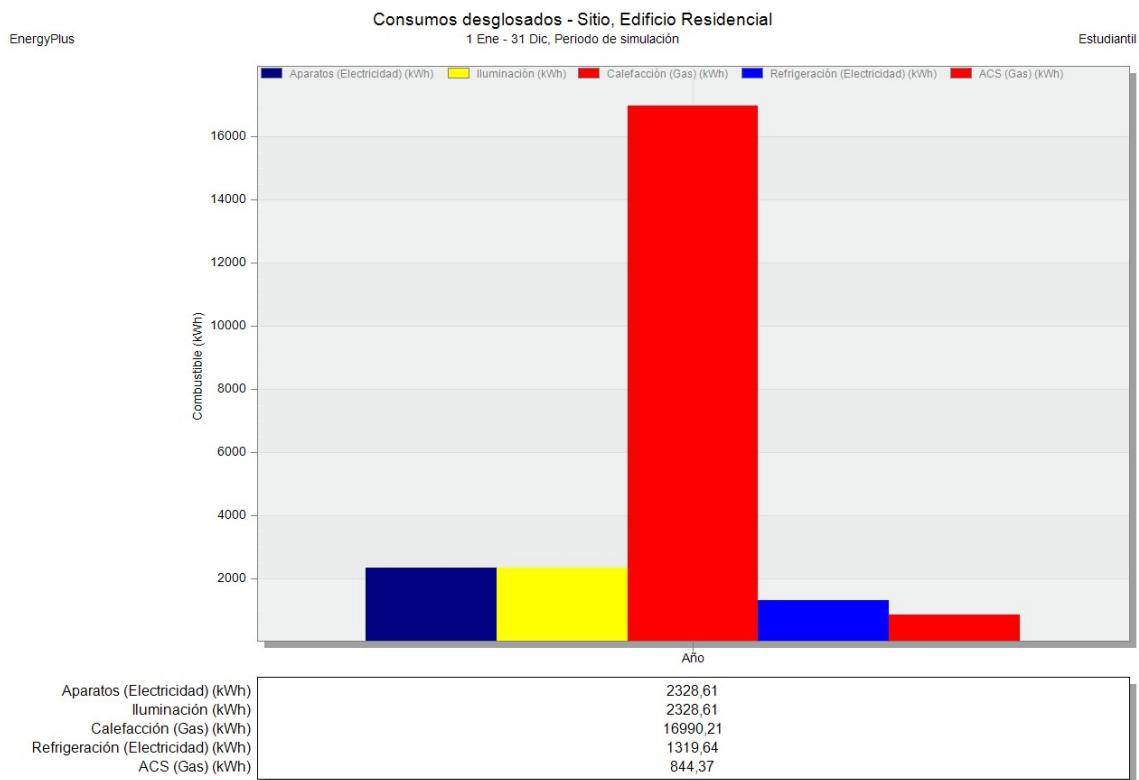


Figura 35 Gráfica Consumo anual NBE-CT-1979[1].

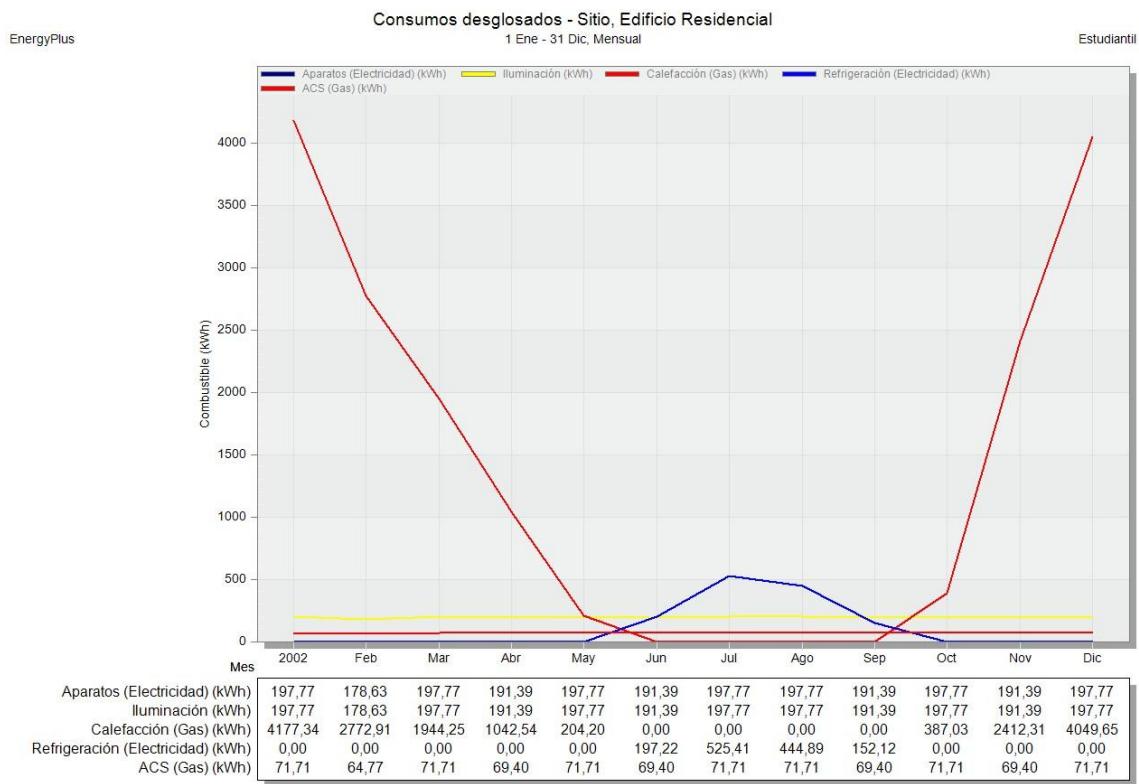


Figura 36 Gráfica Consumo mensual NBE-CT-1979[1].

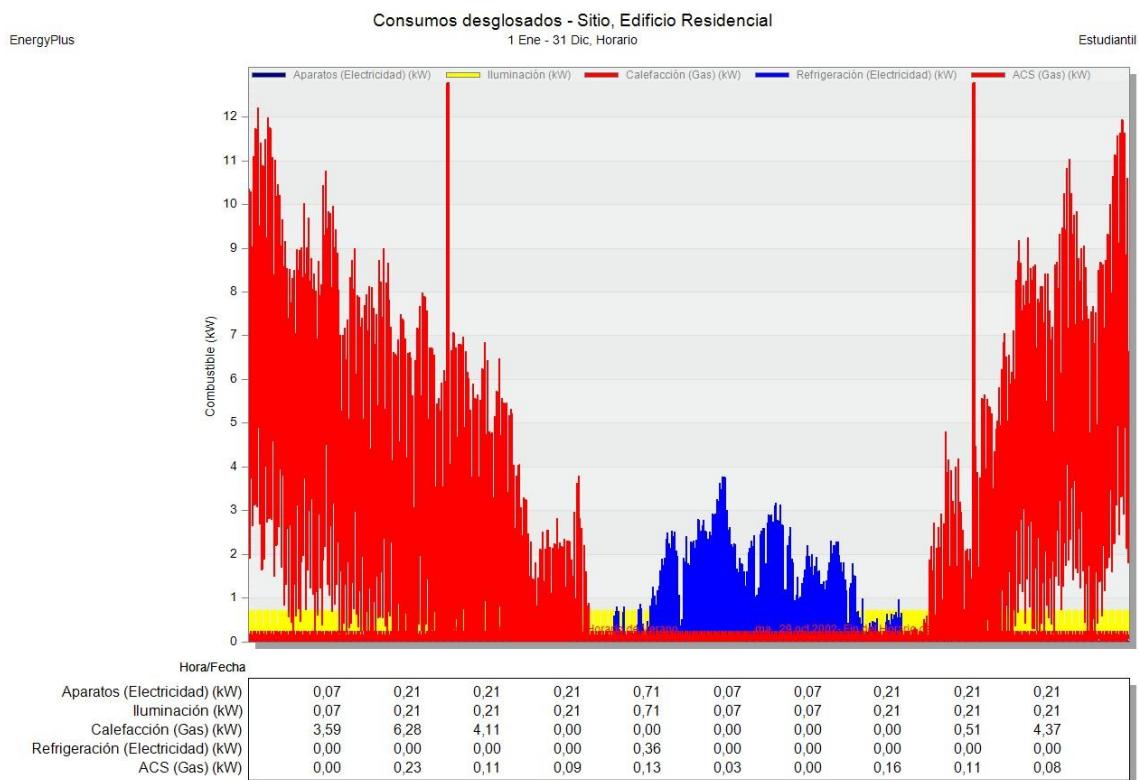


Figura 37 Gráfica Consumo horario NBE-CT-1979[1].

Vamos a agrupar los datos anuales tanto de consumo como de demanda en una tabla para poder visualizarlos de manera más clara. Cabe destacar que todos estos datos están representados en kWh/m² año.

Normativa	Demanda Calefacción	Demanda Refrigeración	Consumo Calefacción	Consumo Refrigeración
NBE-CT-1979[1]	15631,00	2639,27	16990,21	1319,64
CTE DB-HE 2006[3]	9908,29	1969,06	10769,88	984,53
CTE DB-HE 2019[4]	5302,66	2073,36	5763,76	1036,68

Figura 38 Tabla consumos y demandas.

Como se puede apreciar en esta tabla, la evolución de la normativa del código técnico de la edificación sí que ha tenido resultados favorables. Ya que conforme ha ido avanzando la normativa los consumos y las demandas, sobre todo en calefacción, se han reducido radicalmente. Esto significa que nos hemos vuelto más eficientes energéticamente tras la implementación de nuevas y más estrictas directrices constructivas ya que para un edificio con las mismas características hemos logrado una gran reducción del gasto innecesario de energía.

También puede resultar extraño que la demanda de refrigeración sea más alta en 2019 que en 2006, aunque esto se puede justificar debido a que el valor de “U” no sólo de ventanas sino también de opacos es más bajo y eso puede dificultar la cesión de calor de adentro hacia afuera cuando la temperatura del interior supere a la exterior.

Estos valores nos demuestran que estamos siguiendo el consejo y los objetivos marcados por la Unión Europea para reducir el consumo energético de nuestros hogares y alcanzar una mejor eficiencia energética.

3. Modelado bomba de calor

Una vez conocida la demanda tanto de calefacción como de refrigeración que tiene mi vivienda, el siguiente paso es diseñar un sistema que me permita cubrir dichas necesidades. Como ya se comentó en la introducción, la tecnología más eficiente y que logra cumplir con las condiciones impuestas en la normativa son las bombas de calor.

Las bombas de calor tienen una gran variedad de tipologías y sirven para muchas aplicaciones diferentes. A continuación voy a hacer una clasificación de las distintas bombas de calor que nos podemos encontrar en el mercado. Podemos clasificarlas de la siguiente manera:

-Según el medio de origen y destino de la energía.

Es la clasificación más usada y es cuando las bombas de calor se definen mediante dos palabras (Medio que absorbe el calor (foco frío) – Medio receptor (foco caliente)).

- Bomba de calor aire-aire: la más utilizada sobre todo en climatización.
- Bomba de calor aire-agua: producción de agua fría para refrigeración o agua caliente para calefacción y agua sanitaria.
- Bomba de calor agua-aire: aprovechan la energía contenida en ríos, mares, aguas residuales... Se mejora el rendimiento energético en relación a las de aire por la uniformidad de la temperatura a lo largo del año.
- Bombas de calor agua-agua: similares a las anteriores, pero con emisores de baja temperatura (suelo radiante, fan-coils).

-Según construcción.

- Bomba de calor split: está formada por dos unidades completamente separadas (unidad interior y unidad exterior).
- Bomba de calor multi-split: está formada por varias unidades interiores y por una unidad exterior.
- Bomba de calor compacta: todos los elementos que constituyen la bomba de calor están alojados dentro de una misma carcasa.

-Según funcionamiento.

- Reversibles: pueden funcionar tanto en modo calefacción como en ciclo frigorífico, invirtiendo el sentido del fluido frigorífico gracias a una válvula de 4 vías.
- No reversibles: únicamente funcionan en modo calefacción.

Ahora voy a explicar estas dos formas de funcionamiento de las bombas de calor y ver que equipos básicos los forman.

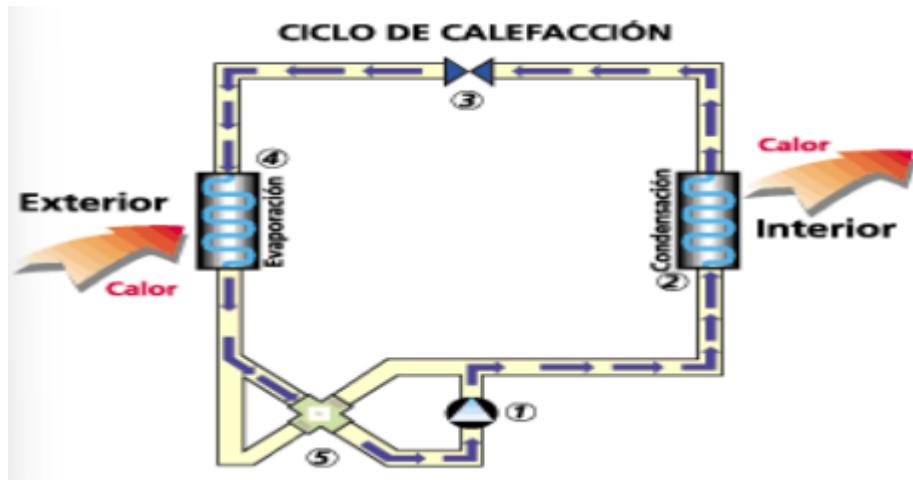


Figura 39 Representación modo calefacción bomba de calor. Fuente: Apuntes Calor y Frío Industrial [25].

En el modo calefacción el elemento designado por el número uno es un compresor, que tiene la función de elevar la presión y temperatura del fluido frigorífico. Tras ello pasa por el elemento número dos, el cual es un condensador, que se sitúa en el interior del recinto a calefactar. El fluido cede al aire del recinto el calor de su condensación. El elemento número tres es una válvula de expansión. La válvula expande el fluido que ha salido del condensador, en estado líquido y alta presión y temperatura, y reduce su presión y temperatura produciendo así una evaporación parcial de este. Para terminar el ciclo el fluido pasa por el evaporador (elemento cuatro) que se encuentra en el exterior. Y al absorber el calor del aire exterior se termina el proceso de evaporación y este regresa al compresor mediante una válvula de cuatro vías.



Figura 40 Representación modo refrigeración bomba de calor. Fuente: Apuntes Calor y Frío Industrial [25].

El proceso empieza nuevamente con un aumento de la presión y temperatura del fluido por parte del compresor (elemento 1). Ahora el condensador situado en el exterior

(elemento 4) condensa el fluido cediendo su calor al medio exterior. El fluido en estado líquido y alta presión se expande en la válvula de expansión (elemento 3), reduciendo su presión y evaporándose parcialmente. Por último el fluido pasa por el elemento cuatro, que se encuentra en el interior del recinto a refrigerar, donde se completa su evaporación y así se absorbe calor del medio interior. Para finalizar y poder volver a repetir el ciclo, el fluido refrigerante vuelve nuevamente al compresor.

Durante la explicación del proceso de funcionamiento de una bomba de calor se ha mencionado la palabra fluido refrigerante. Este es el encargado de hacer funcionar la bomba de calor, ya que realiza los balances energéticos tanto en el condensador como en el evaporador. Y por tanto es muy importante controlar sus propiedades en sus distintos estados termodinámicos y asegurarnos que nos ofrece las prestaciones que a nosotros nos interesa. Como ya se había comentado en las primeras páginas del trabajo, voy a simular y ver los resultados que nos ofrece la bomba de calor con distintos tipos de refrigerantes.

El fluido refrigerante no es más que un compuesto químico que realiza un ciclo durante el cual se vaporiza (absorbiendo calor) y se condensa (cediendo calor) de forma alternativa. Las propiedades que nosotros buscamos en nuestros fluidos refrigerantes son las siguientes:

- El exponente de compresión adiabática del vapor sea lo más próximo a la unidad. Debido a que cuanto menor sea este exponente menor es el recalentamiento que se consigue para la misma relación de compresión.
- El calor específico del líquido del fluido refrigerante queremos que sea lo más bajo posible. Ya que cuanto más pequeño sea menor será la fracción de líquido evaporado en la expansión.
- El calor específico del vapor nos interesa que sea lo más alto posible para mejorar el efecto de refrigeración en el evaporador y menor recalentamiento se provoca en la tubería de succión del compresor.
- El calor latente de vaporización cuanto más elevado sea mayor será el efecto frigorífico por cada kg de fluido en circulación.
- Cuanto menor sea el volumen específico del vapor mayor será el calor latente por metro cúbico de vapor aspirado en el evaporador (potencia frigorífica por unidad de volumen). El volumen específico del vapor puede influir en la

elección del compresor (volúmenes específicos bajos se usan en compresores alternativos y volúmenes altos para compresores centrífugos).

- Nos interesa que la temperatura crítica sea elevada para que el sobrecalentamiento que se produce en la compresión sea lo menor posible.
- Además queremos que nuestro fluido refrigerante cuente con buenas propiedades químicas como neutralidad química, estabilidad química, disolvente del H₂O y que no sea ni inflamable ni explosivo.
- Y también buscamos que nuestro fluido refrigerante tenga una baja viscosidad para que mejore su fluidez y menor sea la perdida de presión.
- Una alta conductividad térmica para poder reducir el tamaño y el coste del equipo de trasferencia.

Una vez explicado el funcionamiento de una bomba de calor y las propiedades que buscamos para el fluido refrigerante que va a circular por mi equipo ya podemos empezar con la modelización. Para modelar una bomba de calor debemos de modelar los principales equipos que lo componen (compresor, condensador, evaporador y válvula de expansión) y trazar el ciclo termodinámico que sufre el fluido refrigerante durante el proceso. Para ello voy a usar el programa EES y durante la explicación de proceso se adjuntaran capturas de la interfaz del programa para facilitar la compresión del proceso realizado.

Debido a que mi vivienda se sitúa en Teruel y que en esa zona climática, como se refleja en las simulaciones, hay una mayor demanda de calefacción que de refrigeración. He decidido que la bomba de calor que voy a implementar en la vivienda sea no reversible y que funcione solo en modo de calefacción, la bomba de calor es aire-agua. En cualquier caso, el esquema propuesto híbrido está justificado para cubrir la demanda de ACS (no estudiada aquí en detalle en el análisis de dicha integración), y el sistema en modo reversible será factible con fan-coils que usarán el agua fría producida en el modo inverso, si fuera necesario en el caso de Teruel para periodos puntuales tal y como hemos visto en la estimación de DesignBuilder.

A continuación voy a mostrar el proceso de modelización con el refrigerante R134-a, con el resto de refrigerantes sería seguir el mismo procedimiento lo único que cambia son los resultados y propiedades (que analizaré y compararé más adelante).

Primero lo que hice fue plantear un ciclo termodinámico básico que simulase lo que ocurría a nuestro fluido refrigerante durante el funcionamiento de la bomba de calor. Para ello tome varias simplificaciones como por ejemplo que a la salida del evaporador

(estado 1) fuese vapor saturado nuestro fluido refrigerante ($x_1=1$), la salida del condensador (estado 3) en condiciones de líquido saturado ($x_3=0$), el paso por la válvula de expansión era un proceso isoentálpico ($h_3=h_4$) y que el paso por el compresor era un proceso isoentrópico ($s_1=s_2$). Todo esto con el fin de situar y hacer un primer planteamiento del problema, ya que al conocer las propiedades de los distintos estados (estado 2 salida compresor y estado 4 salida válvula de expansión) pude realizar balances energéticos a los distintos equipos para poder aplicar las fórmulas de COP y poder saber un primer rendimiento de nuestro ciclo termodinámico. El resultado fue el siguiente:

Sort	1 h _i [kJ/kg]	2 P _i [kPa]	3 s _i [kJ/kg-K]	4 T _i [C]	5 v _i [m ³ /kg]	6	x _i
[1]	241,5	164	0,9414	-15,01	0,1206		1
[2]	282,1	1150	0,9414	52,37			
[3]	115,3	1150	0,4167	44,65			0
[4]	115,3	164	0,4525	-15,01			

Figura 41 Tabla propiedades ciclo simplificado R134-a.

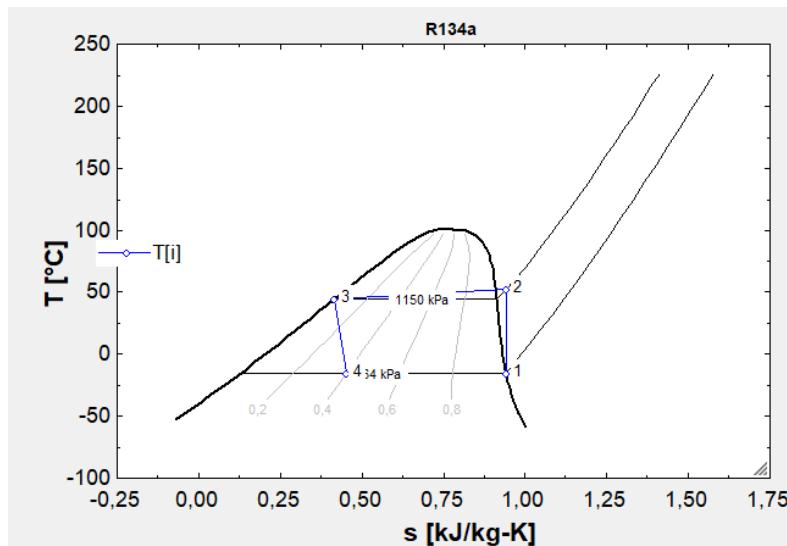


Figura 42 Gráfica ciclo simplificado R134-a.

Donde conseguimos un COP de 3,198.

Cabe remarcar que todo el código desarrollado para cada modelo de EES se encuentra en los anexos de manera íntegra. Donde se puede consultar todos los COP para los distintos refrigerantes.

No obstante estos modelos simplificados debemos de pulirlos ya que existen muchas mejoras a implementar para simular el comportamiento real de una bomba de calor. Por ejemplo en cualquier ciclo real tanto el estado 1 como el estado 3 no se encuentra en

una condición de saturación, ya que el compresor no está diseñado para trabajar con una mezcla bifásica. Por esta razón siempre se hace un sobrecalentamiento en el estado 1 y un subenfriamiento en el estado 3. Con esto aumenta en gran medida el rendimiento del ciclo.

La presión del evaporador debe ser mayor a la atmosférica (condición de seguridad para trabajar con cualquier equipo). La presión del condensador debe ser lo suficientemente baja ya que esto determina la robustez del compresor y condensador (a mayor presión del condensador mayor es la robustez del equipo y mayor es el precio de este).

Vamos a intentar buscar que el punto de ebullición sea bajo para que aun operando a presiones positivas se pueda tener una temperatura baja en el evaporador. Y el evaporador debe tener una temperatura más baja que la que se desea tener en el espacio refrigerado. La temperatura de congelación de un refrigerante debe ser más baja que la temperatura del evaporador.

La clave para el diseño de un buen ciclo termodinámico y para el modelado de los equipos que componen la bomba de calor es una buena elección de la presión de alta (presión del condensador) y presión de baja (presión del evaporador).

Con todas estas premisas ya podemos ajustar y mejorar el ciclo termodinámico básico que habíamos planteado anteriormente. Además de mejorar la modelización de cada equipo que compone la bomba de calor, ya que no es suficiente con hacer un simple balance en el condensador y evaporador. Debido a que estos equipos produzcan más o menos potencia (kW) depende de muchos otros factores que a continuación veremos.

Como sucedía con el planteamiento de los ciclos termodinámicos simplificados, todo el código y los resultados van a estar de manera íntegra en los anexos para los distintos refrigerantes. Pero para explicar las ecuaciones planteadas solo vamos a poner el caso del refrigerante R134-a.

Lo primero de todo es modificar el ciclo termodinámico, para ello lo que vamos a hacer es ajustar tanto la temperatura “T1” como la temperatura “T3” y así conseguiremos producir el fenómeno de sobrecalentamiento y subenfriamiento en nuestro ciclo. Y también tenemos que eliminar la suposición de que el estado 1 y el estado 3 están saturados. Con todo esto ya podemos rehacer nuestro ciclo termodinámico y saber las propiedades de nuestro fluido refrigerante en cualquier punto del ciclo. El resultado sería el siguiente:

$$P_1 = 164 \text{ [kPa]}$$

$$P_2 = 1150 \text{ [kPa]}$$

$$P_3 = P_2$$

$$P_4 = P_1$$

$$s_1 = s_2$$

$$h_3 = h_4$$

$$h_1 = h(\text{R134a}; T = T_1; P = P_1)$$

$$s_1 = s(\text{R134a}; T = T_1; P = P_1)$$

$$T_1 = -1$$

$$v_1 = v(\text{R134a}; T = T_1; h = h_1)$$

$$h_2 = h(\text{R134a}; s = s_2; P = P_2)$$

$$T_2 = T(\text{R134a}; P = P_2; h = h_2)$$

$$h_3 = h(\text{R134a}; T = T_3; P = P_3)$$

$$T_3 = 42$$

$$s_3 = s(\text{R134a}; T = T_3; P = P_3)$$

$$T_4 = T(\text{R134a}; P = P_4; h = h_4)$$

$$s_4 = s(\text{R134a}; P = P_4; h = h_4)$$

Figura 43 Propiedades ciclo R134-a.

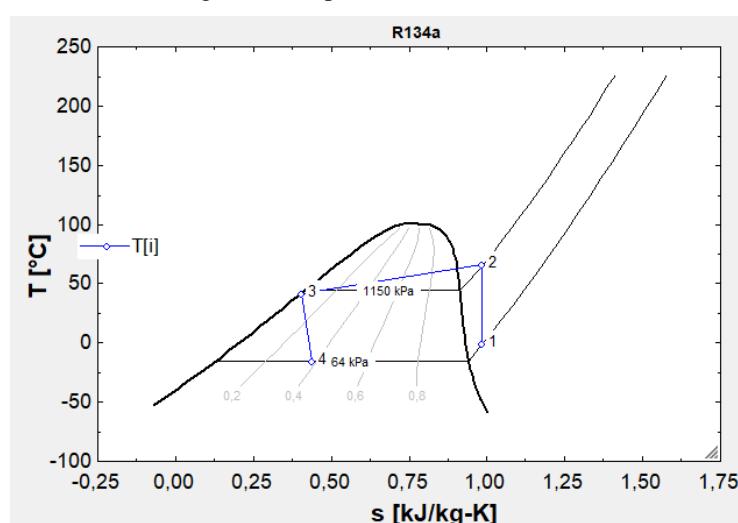


Figura 44 Gráfica ciclo R134-a.

Donde aquí ya podemos apreciar el fenómeno de subenfriamiento y sobrecalentamiento.

Cabe remarcar que las unidades con las que se trabaja en EES para los diferentes refrigerantes son las siguientes:

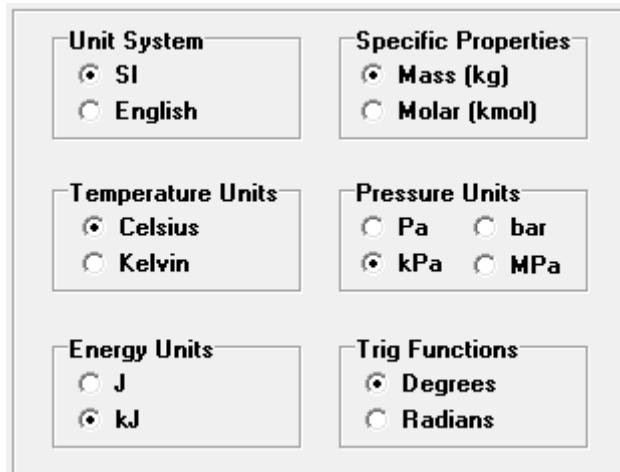


Figura 45 Unidades de trabajo EES.

Una vez definido el ciclo termodinámico vamos a presentar las ecuaciones que van a definir los equipos que componen nuestra bomba de calor. Para ello he estado revisando muchos artículos científicos ([7]-[12]) y tras una tarea de investigación el modelo de cada uno de los equipos es el siguiente:

-Compresor

El compresor seleccionado es de desplazamiento positivo. Para llevar a cabo el desarrollo de este modelo de compresor he consultado el artículo [11] donde he adaptado las ecuaciones que exponía dicho artículo a mis necesidades y el resultado final sería el siguiente:

$$W_{real_compresor} = \dot{m}_{real} \cdot \left[\frac{h_2 - h_1}{rend_{is}} \right]$$

$$rend_{is} = 0,874 - 0,0135 \cdot \frac{P_2}{P_1}$$

Figura 46 Modelo compresor EES.

Nosotros conocemos las propiedades termodinámicas que se usan en las ecuaciones del compresor, ya que las hemos definido previamente.

-Evaporador

Tanto las ecuaciones para el cálculo de la potencia que nos proporciona el evaporador como el condensador las he consultado en el artículo [7]. Donde se detalla las distintas fases por las que pasa el fluido. Es decir la trasferencia de calor a lo largo del paso del evaporador no es la misma en todos los tramos, debido a que el fluido pasa de un estado líquido a una mezcla líquido más vapor para finalmente acabar como vapor

sobreelentado. Cabe destacar que el intercambio de energía en el evaporador se realiza mediante el aire y en el condensador se usa el agua. Estos fenómenos están representados mediante las siguientes ecuaciones, donde las 2 y 3 secciones de intercambio de calor caracterizadas por el diferente estado físico del refrigerante están integradas en una única ecuación de intercambio térmico Q. Esta depende de los coeficientes U estimados en cada sección a partir de sus alfas tanto internos como externos como la resistencia térmica del metal separador.

Mejora evaporador

$$Q_{eva} = U_{tp_{eva}} \cdot \left[A_{eva} - C_{eva} \cdot \frac{\dot{m}_{real}}{U_{sh_{eva}}} \cdot \ln \left(\frac{T_a - T_1}{T_a - T_{eva}} \right) \right] \cdot (T_a - T_{eva}) + C_{eva} \cdot \dot{m}_{real} \cdot (T_1 - T_{eva})$$

$$U_{tp_{eva}} = \left[\frac{1}{\alpha_{fatp_{eva}}} + \frac{d_{eva}}{2 \cdot 1000} \cdot \frac{l_{eva}}{1000} \cdot \ln \left(\frac{d_{o_{eva}}}{d_{eva}} \right) + \frac{1}{\alpha_{fa0_{eva}} \cdot \varepsilon \cdot \eta_{fin}} \cdot \frac{A_{eva} \cdot 0,8}{A_{o_{eva}}} \right]^{-1}$$

$$U_{sh_{eva}} = \left[\frac{1}{\alpha_{fash_{eva}}} + \frac{d_{eva}}{2 \cdot 1000} \cdot \frac{l_{eva}}{1000} \cdot \ln \left(\frac{d_{o_{eva}}}{d_{eva}} \right) + \frac{1}{\alpha_{fa0_{eva}} \cdot \varepsilon \cdot \eta_{fin}} \cdot \frac{A_{eva} \cdot 0,2}{A_{o_{eva}}} \right]^{-1}$$

Figura 47 Ecuaciones evaporador EES.

El significado de cada parámetro es el siguiente:

A_{eva} : Área interna evaporador (m²)

$A_{o_{eva}}$: Área externa evaporador (m²)

C_{eva} : Calor específico (kJ/(kg K))

T_a : Temperatura aire (°C)

T_1 : Temperatura estado 1 (°C)

T_{eva} : Temperatura evaporador (°C)

$U_{tp_{eva}}$: Coeficiente global transferencia calor bifásico kW/(m² K)

$U_{sh_{eva}}$: Coeficiente global transferencia calor sobreelentado kW/(m² K)

d_{eva} : Diámetro interno tubo de cobre (m)

$d_{o_{eva}}$: Diámetro externo tubo de cobre (m)

l_{eva} : Conductividad térmica kW/(m k)

ε : Coeficiente deshumidificación.

η_{fin} : Rendimiento aletas

$\alpha_{fatp_{eva}}$: Coeficiente de transferencia de calor bifásico del refrigerante kW/(m² K)

$\alpha_{fa0_{eva}}$: Coeficiente de transferencia de calor exterior del aire kW/(m² K)

$\alpha_{fash_{eva}}$: Coeficiente de transferencia de calor sobreelentado del refrigerante kW/(m² K)

De estas ecuaciones tenemos todos los datos termodinámicos (conocemos todas las temperaturas) y también conocemos los datos geométricos. Lo único que nos falta calcular son los “alfa”. El proceso para calcular estos coeficientes convectivos usualmente denominados “h” sería el siguiente. Toda la información para el cálculo de los coeficientes ha sido extraída de los apuntes de la asignatura Ingeniería Térmica del grado de Ingeniería Mecánica, impartida por Javier Uche.

alfao_{eva}:

Este coeficiente como bien se ha definido con anterioridad corresponde a la trasferencia de calor del exterior. Es decir, debemos de ir a las correlaciones de convección forzada exterior y usar para el cálculo de las propiedades el aire como fluido de trabajo (y no el fluido refrigerante R134-a).

Lo que nosotros buscamos es una correlación que nos permita calcular para nuestro caso el número de Nusselt, para que podamos aplicar la siguiente ecuación y calcular el coeficiente de transferencia de calor:

$$\text{alfao}_{\text{eva}} = (k_{\text{eva}-\text{aire}} * \text{Nu}_{\text{eva}-\text{aire}})/d_{\text{o eva}}$$

El proceso del cálculo del número de Nusselt y del coeficiente de transferencia de calor se muestra como lo he realizado en EES a continuación:

```

alfao_eva=(Nu_eva_aire*k_eva_aire)/do_eva
Tp_eva=(Ta+T[1])/2
densidad_eva=Density(Air;T=Tp_eva;P=P[1])
nu_aire=KinematicViscosity(Air;T=Tp_eva;P=P[1])
Re_eva_aire=(velocidad_aire*do_eva)/nu_aire
velocidad_aire=2
"Tabla 1 Re_eva_aire=2209"
C=0,683
m=0,466
Pr_eva_aire=Prandtl(Air;T=Tp_eva)
k_eva_aire=Conductivity(Air;T=Tp_eva)
Nu_eva_aire=C*(Re_eva_aire^m)*Pr_eva_aire

```

Figura 48 Ecuaciones cálculo alfa_{eva} EES.

alfash_{eva}:

Este coeficiente hace referencia al estado termodinámico en el que nuestro fluido refrigerante está en estado vapor y sobrecalegado. Donde aquí tenemos que usar correlaciones de convección forzada interior. Nuestro objetivo es el mismo que con el anterior coeficiente, debemos usar una correlación para calcular el número de Nusselt y finalmente aplicando la misma ecuación sacaremos el coeficiente buscado. El proceso del cálculo del número de Nusselt y del coeficiente de transferencia de calor se muestra como lo he realizado en EES a continuación:

```

alfash_eva=(Nu_eva_sh*k_eva_sh)/di_eva

k_eva_sh=Conductivity(R134a;T=T[1];P=P[1])
Re_sh_eva=(4*(m_dot_real/Numero_tubos))/(di_eva^3,14*mu_eva_sh)
Pr_sh_eva=Prandtl(R134a;T=T[1];P=P[1])
mu_eva_sh=Viscosity(R134a;T=T[1];P=P[1])
Nu_eva_sh=0,023*(Re_sh_eva^0,8)*(Pr_sh_eva^0,4)

```

Figura 49 Ecuaciones cálculo alfash_eva EES.

alfatp_eva:

Es el coeficiente más difícil y complejo de obtener, ya que representa la transferencia de calor que se produce cuando se genera el cambio de fase de líquido a vapor de nuestro fluido refrigerante dentro de la tubería. Las ecuaciones que he introducido en EES para poder obtener este coeficiente son:

```

alfatp_eva=hen+hc

hc=0,023*(k_l_eva/di_eva)*(Re_l_eva^0,8)*(Pr_l_eva^0,4)*F
hen=0,00122*((k_l_eva^0,79)*(cp_l_eva^0,45)*(densidad_l_eva^0,49))/((sigma_l_eva^0,5)*(mu_l_eva^0,29)*(densidad_v_eva^0,24)*(h_l_eva^0,24)))*(delta_T_eva^0,24)*(delta_P_eva^0,75)*S
S=1/(1+0,00000253*(Re_BF_eva^1,17))
Re_BF_eva=(F^1,25)*Re_l_eva

Psat_eva=200,7
delta_P_eva=(Psat_eva-P[1])*1000 [Pa]
delta_T_eva=(T[1]+273)-(Tsat_eva+273)
h_l_eva=Enthalpy(R134a;T=Tsat_eva,P=P[1])
sigma_l_eva=SurfaceTension(R134a;T=Tp_eva)
k_l_eva=Conductivity(R134a;T=Tsat_eva,P=P[1])
cp_l_eva=Cp(R134a;T=Tsat_eva,P=P[1])
Re_l_eva=((m_dot_real/Ai_eva)*(1-X)*di_eva)/mu_l_eva
X=0,9
mu_l_eva=Viscosity(R134a;T=Tsat_eva,P=P[1])
Pr_l_eva=Prandtl(R134a;T=Tsat_eva,P=P[1])
Tsat_eva=-15,01
Tp_eva_v=(Tsat_eva+Ta)/2
" F depende del Parametro de Martinelli"
Xtt=((1-X)/X)^0,9)*((densidad_v_eva/densidad_l_eva)^0,5)*((mu_l_eva/mu_v_eva)^0,1)
densidad_v_eva=Density(R134a;T=Tp_eva_v,P=P[1])
densidad_l_eva=Density(R134a;T=Tsat_eva,P=P[1])
mu_v_eva=Viscosity(R134a;T=Tp_eva_v,P=P[1])
" Xtt menor que 10"
F=2,35*((1/Xtt)+0,213)^0,736

```

Figura 50 Ecuaciones cálculo alfatp_eva EES.

Una vez calculado todos los coeficientes de transferencia de calor, podemos conocer cuál es el valor de Q_{eva} (kW).

-Condensador

Una vez hemos modelado nuestro evaporador, el último equipo que nos falta por modelar para completar nuestra bomba de calor es el condensador. En nuestro caso el condensador estructuralmente está compuesto por un conjunto de tubos de cobre en el interior de un tanque de agua a modo de serpentín. Las ecuaciones que definen a nuestro equipo son las siguientes, en este caso algo más complejas que para el evaporador al incluir tres secciones de intercambio en vez de dos:

Mejora condensador

$$Q_{cond} = C_{cond} \cdot \dot{m}_{real} \cdot (T_2 - T_{cond}) + \dot{m}_{real} \cdot r_{cond} + U_{sc_{cond}} \cdot \left[A_{i_{cond}} - C_{cond} \cdot \frac{\dot{m}_{real}}{U_{sh_{cond}}} \cdot \ln \left(\frac{T_{cond} - T_w}{T_2 - T_w} \right) - \dot{m}_{real} \cdot \frac{r_{cond}}{U_{tp_{cond}} \cdot (T_{cond} - T_w)} \right] \cdot \left[\frac{T_{cond} - T_3}{\ln \left(\frac{T_{cond} - T_w}{T_3 - T_w} \right)} \right]$$

$$U_{tp_{cond}} = \left[\frac{1}{alfatp_{cond}} + \frac{di_{cond}}{2 \cdot k_{cond}} \cdot \ln \left(\frac{do_{cond}}{di_{cond}} \right) + \frac{1}{alfa_w} \cdot \frac{Ai_{cond} \cdot 0,6}{Ao_{cond}} \right]^{-1}$$

$$U_{sh_{cond}} = \left[\frac{1}{alfash_{cond}} + \frac{di_{cond}}{2 \cdot k_{cond}} \cdot \ln \left(\frac{do_{cond}}{di_{cond}} \right) + \frac{1}{alfa_w} \cdot \frac{Ai_{cond} \cdot 0,3}{Ao_{cond}} \right]^{-1}$$

$$U_{sc_{cond}} = \left[\frac{1}{alfasc_{cond}} + \frac{di_{cond}}{2 \cdot k_{cond}} \cdot \ln \left(\frac{do_{cond}}{di_{cond}} \right) + \frac{1}{alfa_w} \cdot \frac{Ai_{cond} \cdot 0,1}{Ao_{cond}} \right]^{-1}$$

Figura 51 Ecuaciones condensador EES.

Estas ecuaciones son muy parecidas a las del evaporador con la diferencia que ahora introducimos una T_w (temperatura de agua en el tanque, °C) y tenemos un $alfasc_{cond}$ que se refiere al estado subenfriado de nuestro fluido refrigerante.

El significado de cada parámetro es el siguiente:

Ai_{cond} : Área interna condensador (m²)

Ao_{cond} : Área externa condensador (m²)

C_{cond} : Calor específico condensador (kJ/(kg K))

T_w : Temperatura agua (°C)

T_3 : Temperatura estado 3 (°C)

T_2 : Temperatura estado 2 (°C)

T_{cond} : Temperatura condensador (°C)

r_{cond} : Calor latente condensador (kJ/kg)

$U_{tp_{cond}}$: Coeficiente global transferencia calor bifásico kW/(m² K)

$U_{sh_{cond}}$: Coeficiente global transferencia calor sobrecalentado kW/(m² K)

$U_{sc_{cond}}$: Coeficiente global transferencia calor subenfriado kW/(m² K)

di_{cond} : Diámetro interno tubo de cobre (m)

do_{cond} : Diámetro externo tubo de cobre (m)

K_{cond} : Conductividad térmica condensador kW/(m k)

$alfatp_{cond}$: Coeficiente de transferencia de calor bifásico refrigerante kW/(m² K)

$alfa_w$: Coeficiente de transferencia de calor exterior agua kW/(m² K)

$alfash_{cond}$: Coeficiente de transferencia de calor sobrecalentado refrigerante kW/(m² K)

$alfasc_{cond}$: Coeficiente de transferencia de calor subenfriado refrigerante kW/(m² K)

Como en el evaporador los únicos parámetros que desconocemos para el cálculo de Q_{cond} son los “alfa”. Por lo que vamos a ir presentando uno por uno como se ha realizado el cálculo de estos.

alfa_w: Para el cálculo de este coeficiente debemos trabajar con agua ya que es el fluido que se encuentra en el tanque. Debemos buscar correlaciones de convección natural debido a la disposición constructiva de nuestro condensador. Al igual que en los casos anteriores vamos a calcular el número de Nusselt mediante una correlación y con las propiedades termodinámicas del agua, que las conocemos de antemano, podemos sacar el valor de alfa_w. Las ecuaciones usadas para el cálculo de este coeficiente son las siguientes:

```
R_tanque=0,25
L_tanque=0,764
Volumen_tanque=0,15
beta_tanque=VolExpCoef(Water;T=Tm_cond;P=100)
alpha_agua=ThermalDiffusivity(Water;T=Tm_cond;P=100)
Gr=9,8*beta_tanque*(T[2]-Tw)*(L_tanque^3)/(alpha_agua)
Pr_cond_w=Prandtl(Water;T=Tm_cond;P=100)
Ra_cond=Gr*Pr_cond_w
Nu_cond_w=0,59*(Ra_cond^(1/4))
k_cond_w=Conductivity(Water;T=Tm_cond;P=100)
alfa_w=(Nu_cond_w*k_cond_w)/do_cond
Tm_cond=(Tw+T[2])/2
```

Figura 52 Ecuaciones cálculo alfa_w EES.

alfash_{cond}:

En este caso las ecuaciones son homologas a las utilizadas para calcular el coeficiente “alfash_{eva}”, evidentemente los resultados son muy distintos porque las presiones y las temperaturas son completamente distintas. Las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

```
alfash_cond=(Nu_cond_sh*k_cond_sh)/di_cond
k_cond_sh=Conductivity(R134a;T=T[2];P=P[2])
Re_sh_cond=(4*(m_dot_real/Numero_tubos))/(di_cond*3,14*mu_cond_sh)
Pr_sh_cond=Prandtl(R134a;T=T[2];P=P[2])
mu_cond_sh=Viscosity(R134a;T=T[2];P=P[2])
Nu_cond_sh=0,023*(Re_sh_cond^0,8)*(Pr_sh_cond^0,3)
```

Figura 53 Ecuaciones cálculo alfash_{cond} EES.

alfasc_{cond}:

Para obtener este coeficiente de transferencia de calor debemos de calcular el número de Nusselt mediante las correlaciones de convección forzada interior, teniendo en cuenta que el fluido refrigerante se encuentra en estado líquido y que dependiendo del número

de Reynolds puede ser el flujo laminar o turbulento. La correlación seleccionada y las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

```

alfasc_cond=(Nu_cond_sc*k_cond_sc)/di_cond

k_cond_sc=Conductivity(R134a;T=T[3];P=P[3])
Re_sc_cond=(4*(m_dot_real/Numero_tubos))/(di_cond*3,14*mu_cond_sc)
Pr_sc_cond=Prandtl(R134a;T=T[3];P=P[3])
mu_cond_sc=Viscosity(R134a;T=T[3];P=P[3])
Nu_cond_sc=3,66

```

Figura 54 Ecuaciones cálculo alfasc_cond EES.

alfatp_{cond}:

Al igual que pasaba con el evaporador, el coeficiente alfatp_{cond} es el más laborioso de calcular ya que debemos de ir a correlaciones de convección bifásica que modelen el cambio de fase de nuestro fluido refrigerante. Donde debemos calcular varios número de Reynolds, el número de Prandtl e incluir muchas propiedades termodinámicas de nuestro fluido refrigerante en las ecuaciones empleadas. El resultado de dicho proceso es el siguiente:

```

Re_tp_cond=(densidad_v_cond*u_mv*di_cond)/mu_v_cond
Tsat_cond=29,84
Tp_cond_v=(Tw+Tsat_cond)/2
densidad_l_cond=Density(R134a;T=Tp_cond_v;P=P[2])
densidad_v_cond=Density(R134a;T=Tsat_cond;P=P[2])
u_mv=
mu_v_cond=Viscosity(R134a;T=Tp_cond_v;P=P[2])
mu_l_cond=Viscosity(R134a;T=Tsat_cond;P=P[2])
k_cond_l=Conductivity(R134a;T=Tsat_cond;P=P[2])
Pr_l_cond=Prandtl(R134a;T=Tsat_cond;P=P[2])

"Re>35000"

alfatp_cond=(k_cond_l/di_cond)*0,0181*(Pr_l_cond^0,65)*((mu_v_cond/mu_l_cond)^0,078)*
((densidad_l_cond/densidad_v_cond)^0,39)*(((Re_L_cond^0,2)*(Re_T_cond^0,7))/(1,25+0,39*(Re_L_cond/Re_T_cond)))

Re_L_cond=(4*(m_dot_real/Numero_tubos))/(3,14*di_cond*mu_l_cond)
Re_T_cond=(4*m_dot_real)/(3,14*di_cond*mu_l_cond)

```

Figura 55 Ecuaciones cálculo alfatp_{cond} EES.

Con todo esto ya tendría definida completamente la bomba de calor y podría variar la presión de alta como de baja, la temperatura del estado 1 y el estado 3 y el trabajo que nosotros consumimos en el compresor. Para poder apreciar cómo se comporta ante estos cambios y como afecta a su rendimiento y a la producción de potencia de nuestros equipos. El código completo del modelado de la bomba de calor para el refrigerante R134-a se encuentra de manera íntegra en los anexos. La potencia máxima que nos ofrece la bomba de calor con este refrigerante es de 4,6 kW, por eso es necesario hibridar nuestro equipo con una caldera de pellets que nos aporte la potencia que nos falta en las horas de mayor demanda.

4. Modelado caldera de biomasa

Una vez calculado las demandas energéticas que requiere la vivienda unifamiliar, uno de los equipos que se va a hacer cargo de cubrirlas va a ser la bomba de calor que previamente he definido y modelado. Pero no solo este equipo va a desarrollar esta labor, sino que tengo como objetivo hibridar el sistema de bomba de calor con una caldera de biomasa. El objetivo es que la bomba de calor se encargue de cubrir la demanda en la mayoría de las horas del día (donde la demanda no es muy elevada) y que en las horas pico, donde la demanda se dispara, entre como equipo auxiliar nuestra caldera de biomasa. Con el uso de la caldera de biomasa como equipo auxiliar buscamos que las emisiones de CO₂ de la vivienda se reduzcan en gran medida y además el coste de la energía que se consume sea el menor posible para el residente de la vivienda.

Para modelar una caldera de biomasa debemos primero plantear la combustión que se va a llevar acabo y seguidamente ajustarla en función de los valores de la composición de nuestra biomasa.

En mi caso se ha decidido introducir una caldera de biomasa que utilice como combustible pellets. La potencia con la que cuenta nuestra caldera es de 10 kW y en mi modelo de caldera el rendimiento se mantiene constante. Y el procedimiento seguido para la modelización de nuestra caldera de biomasa es el siguiente:

Teniendo en cuenta la reacción química de la combustión de nuestros pellets es:

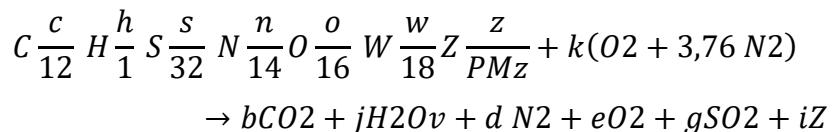


Figura 56 Reacción química Caldera Biomasa.

Y nosotros sabemos perfectamente la composición másica que tiene nuestros pellets, su poder calorífico inferior, conocemos perfectamente la temperatura dentro de la caldera y de los gases, los calores específicos y la potencia del equipo (datos extraídos [17]).

$$c=0,473$$

$$h=0,064$$

$$s=0,0099$$

$$n=0,0013$$

$$o=0,3738$$

$$w=0,07$$

$z=0,008$

$\text{PCI}=1852,23 \text{ kJ/kg}$

$\text{ea}=0,315$

$T_g=133 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_a=25 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$\text{cpgs}=1,1 \text{ kJ/kg K}$

$\text{cpv}=2 \text{ kJ/kg K}$

$\text{cpz}=0,8 \text{ kJ/kg K}$

$Qu=10 \text{ kW}$

Con todos estos datos ya puedo resolver el balance de masa de la reacción. Y como consecuencia puedo conocer cuál es el valor en kg/kg biomasa de los productos de mi combustión. Esto me permite aplicar las fórmulas del rendimiento de la caldera en función del PCI y PCS y puedo saber el gasto de pellets en kilogramos/hora. El código integral del modelado de la caldera de biomasa se encuentra en el anexo nueve, “Modelado caldera de biomasa”.

Al final el cálculo desarrollado en EES nos indica que para una caldera de pellets de 10kW el consumo de pellets es de 2,062 kg/h y que su rendimiento sobre el PCI es de 93,94% y su rendimiento sobre PCS es de 86,59%.

Con todos los equipos ya definidos y modelados, el esquema de la instalación de una manera muy básica sería el siguiente:

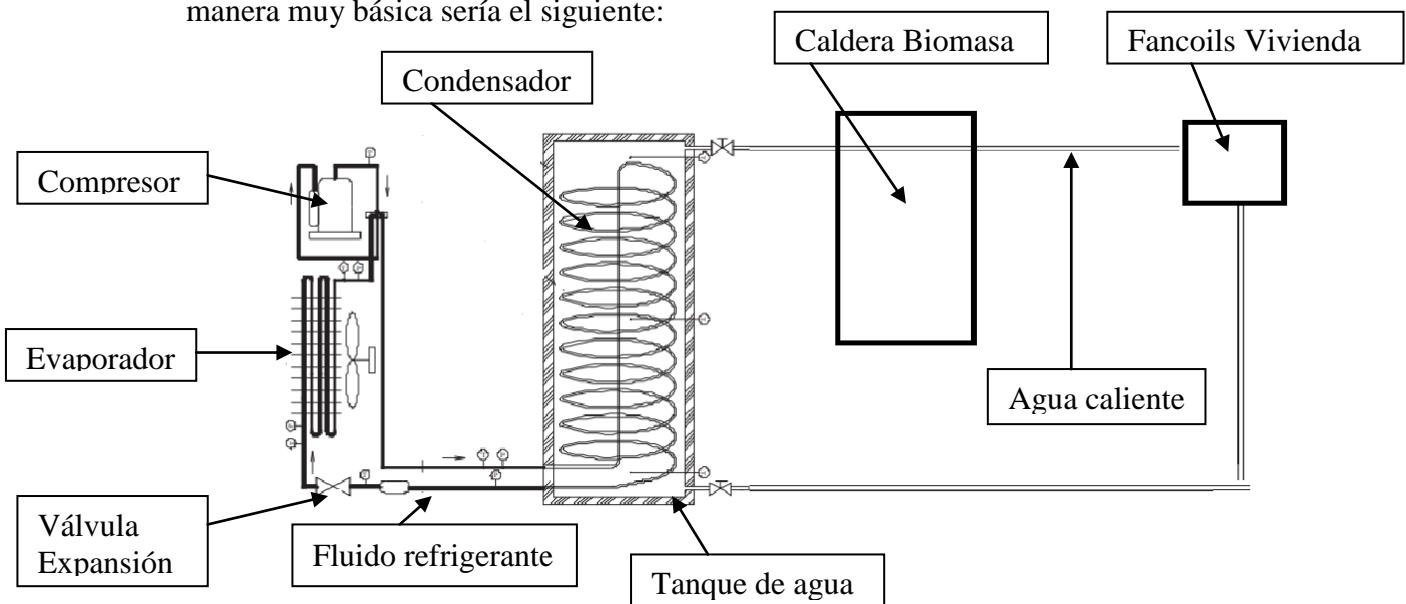


Figura 57 Esquema instalación térmica.

5. Análisis de Resultados

Una vez he terminado de modelar todos mis equipos y he calculado las demandas energéticas que tiene mi vivienda unifamiliar, ya puedo llevar a cabo simulaciones que me indiquen la eficiencia de mis equipos trabajando a carga parcial. Porque como ya he comentado anteriormente, la demanda de calefacción por hora no es constante a lo largo de un día. Es lógico pensar, sin ver las simulaciones, que la demanda de calefacción en un día de invierno será mayor a las siete de la mañana que a las tres de la tarde debido a la temperatura exterior de nuestra vivienda. Y como consecuencia en muchos casos los equipos no podrán trabajar en su carga nominal. El objetivo de este apartado es seleccionar varios días del año y consultar en el programa DesignBuilder cuál es su demanda horaria (usaremos la versión de la vivienda unifamiliar que se ajusta a la normativa NBE-CT-1979(1), donde las demandas de calefacción son las más elevadas entre las tres normativas analizadas). Y una vez consultada la demanda, lo que voy a hacer es distribuirla entre la bomba de calor y nuestro equipo auxiliar (caldera de pellets). Por lo que para las demandas bajas solo hará falta que entre en funcionamiento nuestra bomba de calor y cuando la demanda en una hora determinada supere la potencia que nos aporta la bomba de calor (Q_{cond}), vamos a utilizar la potencia que nos ofrece la caldera de biomasa. Al ir cambiando constantemente los parámetros de “ Q_{cond} ” y “ Qu_cald ”, puedo saber cómo afecta esto al COP de nuestra bomba de calor y a la cantidad de pellets que tengo que utilizar por hora.

En total voy a simular tres días y lo voy a hacer para el refrigerante que en el modelado de mi bomba de calor he obtenido un COP más elevado. Ya que mi bomba de calor es más eficiente con ese fluido refrigerante.

Consultando los valores que encontramos en el anexo ocho, “Resultados bomba de calor EES modelos completo”. Podemos realizar la siguiente tabla comparativa:

Fluido Refrigerante	COP
R134-a	3,281
R22	3,389
R32	3,195
R290	3,484
R410-a	3,201

Figura 58 Tabla resultados COP distintos refrigerantes.

Y como se puede apreciar en la tabla anterior el mejor refrigerante para la bomba de calor que he diseñado es con el R290. Que es el propano, un refrigerante novedoso en cuanto a su bajo ODP pero no en cuanto a su GWP e inflamabilidad.

A continuación voy a mostrar las tablas que he elaborado en el programa EES donde represento lo mencionado con anterioridad. Cabe remarcar que en la columna de “Demanda_Casa_Horaria” la primera fila corresponde a la demanda de calefacción a la 1:00 del día que nosotros estamos simulando y conforme nosotros vamos bajando en la columna las horas del día van avanzando (va de 1:00 hasta las 23:00). Y que cuando yo impongo una Qu_cald de 0,00001 kW representa que la caldera está apagada y no gasto pellets (es un requerimiento para evitar la división por cero en EES).

1. Simulación R290, 5 de Enero.

1.23	1 Demanda_Casa;Horaria;kW	2 Qcond	3 Qu;cald	4 COP_real;bomba;calor	5 ca_pellets;cald	6 UsoBomba;Calor	7 UsoCaldera;Biomasa
Run 1	3,715	3,715	0,00001	2,322	0,000002083	0,6664	0,000001
Run 2	4,139	4,139	0,00001	2,587	0,000002083	0,7424	0,000001
Run 3	4,484	4,484	0,00001	2,803	0,000002083	0,8043	0,000001
Run 4	4,844	4,844	0,00001	3,028	0,000002083	0,8689	0,000001
Run 5	5,089	5,089	0,00001	3,181	0,000002083	0,9128	0,000001
Run 6	5,364	5,364	0,00001	3,352	0,000002083	0,9621	0,000001
Run 7	5,572	5,572	0,00001	3,482	0,000002083	0,9994	0,000001
Run 8	10,9	5,575	5,328	3,484	1,11	1	0,5328
Run 9	11,23	5,575	5,658	3,484	1,179	1	0,5658
Run 10	10,39	5,575	4,813	3,484	1,003	1	0,4813
Run 11	9,565	5,575	3,99	3,484	0,8313	1	0,399
Run 12	8,771	5,575	3,196	3,484	0,6659	1	0,3196
Run 13	7,86	5,575	2,285	3,484	0,4761	1	0,2285
Run 14	7,092	5,575	1,517	3,484	0,3161	1	0,1517
Run 15	6,274	5,575	0,699	3,484	0,1456	1	0,0699
Run 16	5,672	5,575	0,097	3,484	0,02021	1	0,0097
Run 17	5,575	5,575	0,00001	3,484	0,000002083	1	0,000001
Run 18	5,943	5,575	0,368	3,484	0,07667	1	0,0368
Run 19	5,978	5,575	0,403	3,484	0,08396	1	0,0403
Run 20	5,918	5,575	0,343	3,484	0,07146	1	0,0343
Run 21	6,123	5,575	0,548	3,484	0,1142	1	0,0548
Run 22	6,359	5,575	0,784	3,484	0,1633	1	0,0784
Run 23	6,714	5,575	1,139	3,484	0,2373	1	0,1139

Figura 59 Tabla resultados simulación R290, 5 de Enero.

2. Simulación R290, 5 de Marzo.

1.23	1 DemandaCasa;Horaria;KW	2 Qcond	3 Q _{u;cald}	4 COP _{real;bomba;calor}	5 ca _{pellets;cald}	6 UsoBomba;Calor	7 UsoCaldera;Biomasa
Run 1	0,608	0,608	0,00001	0,38	0,000002083	0,1091	0,000001
Run 2	0,976	0,976	0,00001	0,61	0,000002083	0,1751	0,000001
Run 3	1,25	1,25	0,00001	0,7813	0,000002083	0,2242	0,000001
Run 4	1,575	1,575	0,00001	0,9844	0,000002083	0,2825	0,000001
Run 5	1,934	1,934	0,00001	1,209	0,000002083	0,3469	0,000001
Run 6	2,285	2,285	0,00001	1,428	0,000002083	0,4099	0,000001
Run 7	2,528	2,528	0,00001	1,58	0,000002083	0,4535	0,000001
Run 8	6,803	5,575	1,228	3,484	0,2558	1	0,1228
Run 9	6,883	5,575	1,308	3,484	0,2725	1	0,1308
Run 10	6,068	5,575	0,493	3,484	0,1027	1	0,0493
Run 11	5,285	5,285	0,00001	3,303	0,000002083	0,948	0,000001
Run 12	4,385	4,385	0,00001	2,741	0,000002083	0,7865	0,000001
Run 13	3,538	3,538	0,00001	2,211	0,000002083	0,6346	0,000001
Run 14	2,656	2,656	0,00001	1,66	0,000002083	0,4764	0,000001
Run 15	1,955	1,955	0,00001	1,222	0,000002083	0,3507	0,000001
Run 16	1,343	1,343	0,00001	0,8394	0,000002083	0,2409	0,000001
Run 17	0,963	0,963	0,00001	0,6019	0,000002083	0,1727	0,000001
Run 18	0,904	0,904	0,00001	0,565	0,000002083	0,1622	0,000001
Run 19	1,258	1,258	0,00001	0,7863	0,000002083	0,2257	0,000001
Run 20	1,329	1,329	0,00001	0,8306	0,000002083	0,2384	0,000001
Run 21	1,694	1,694	0,00001	1,059	0,000002083	0,3039	0,000001
Run 22	2,134	2,134	0,00001	1,334	0,000002083	0,3828	0,000001
Run 23	2,447	2,447	0,00001	1,529	0,000002083	0,4389	0,000001

Figura 60 Tabla resultados simulación R290, 5 de Marzo.

3. Simulación R290, 6 de Diciembre.

1.23	1 DemandaCasa;Horaria;KW	2 Qcond	3 Q _{u;cald}	4 COP _{real;bomba;calor}	5 ca _{pellets;cald}	6 UsoBomba;Calor	7 UsoCaldera;Biomasa
Run 1	2,551	2,551	0,00001	1,594	0,000002083	0,4576	0,000001
Run 2	3,062	3,062	0,00001	1,914	0,000002083	0,5492	0,000001
Run 3	3,296	3,296	0,00001	2,06	0,000002083	0,5912	0,000001
Run 4	3,708	3,708	0,00001	2,318	0,000002083	0,6651	0,000001
Run 5	4,11	4,11	0,00001	2,569	0,000002083	0,7372	0,000001
Run 6	4,37	4,37	0,00001	2,731	0,000002083	0,7839	0,000001
Run 7	4,663	4,663	0,00001	2,914	0,000002083	0,8364	0,000001
Run 8	9,566	5,575	3,991	3,484	0,8315	1	0,3991
Run 9	9,96	5,575	4,385	3,484	0,9136	1	0,4385
Run 10	9,213	5,575	3,638	3,484	0,758	1	0,3638
Run 11	8,311	5,575	2,736	3,484	0,57	1	0,2736
Run 12	7,405	5,575	1,83	3,484	0,3813	1	0,183
Run 13	6,616	5,575	1,041	3,484	0,2169	1	0,1041
Run 14	5,804	5,575	0,229	3,484	0,04771	1	0,0229
Run 15	4,96	4,96	0,00001	3,1	0,000002083	0,8897	0,000001
Run 16	4,38	4,38	0,00001	2,738	0,000002083	0,7857	0,000001
Run 17	4,32	4,32	0,00001	2,7	0,000002083	0,7749	0,000001
Run 18	4,665	4,665	0,00001	2,916	0,000002083	0,8368	0,000001
Run 19	4,863	4,863	0,00001	3,039	0,000002083	0,8723	0,000001
Run 20	4,847	4,847	0,00001	3,029	0,000002083	0,8694	0,000001
Run 21	5,156	5,156	0,00001	3,223	0,000002083	0,9248	0,000001
Run 22	5,427	5,427	0,00001	3,392	0,000002083	0,9735	0,000001
Run 23	5,712	5,575	0,137	3,484	0,02854	1	0,0137

Figura 61 Tabla resultados simulación R290, 6 de Diciembre.

Con las tablas que he desarrollado puedo sacar varias conclusiones. La primera de todas es el gran descenso que se produce en el COP de nuestra bomba de calor cuando trabaja a una carga que no es la nominal. Esto se ve muy bien reflejado en la simulación del día

5 de Marzo, donde las demandas de calefacción no son muy elevadas y salvo en tres horas del día la bomba de calor puede ella sola encargarse de las demandas horarias. Si representamos esto en una gráfica para verlo de forma clara el resultado sería el siguiente:

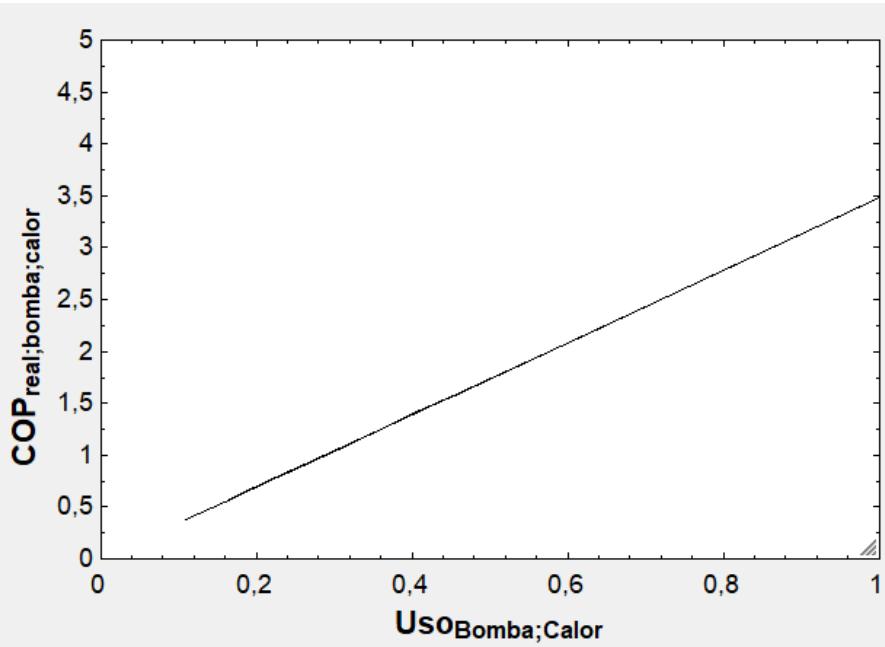


Figura 62 Gráfica comparativa COP y porcentaje uso Bomba, 5 de Marzo.

Donde podemos ver como hay una tendencia lineal ascendente en el aumento del COP de nuestra bomba de calor cuando mayor es el uso de la misma. Esto ocurre porque en el modelo simplificado no se ha impuesto una carga parcial mínima, que en el caso de las bombas de calor con tecnología inverter suele ser del 20%. Además nuestro modelo no ha incluido un rendimiento variable según la carga parcial, que requiere información detallada de los fabricantes.

La caldera de pellets podemos ver que realmente se usa y tiene valor en los meses donde la demanda de calefacción es elevada. Es decir en los meses de marzo y adelante, donde las demandas de calefacción pueden cubrirse únicamente con la bomba de calor, es un equipo poco aprovechado y realmente vemos utilidad en este en los días de invierno. Cabe destacar como el aumento del porcentaje del uso de la caldera incrementa el gasto de pellets como no podría ser de otra forma. Si lo representamos para los datos de simulación del día 5 de enero.

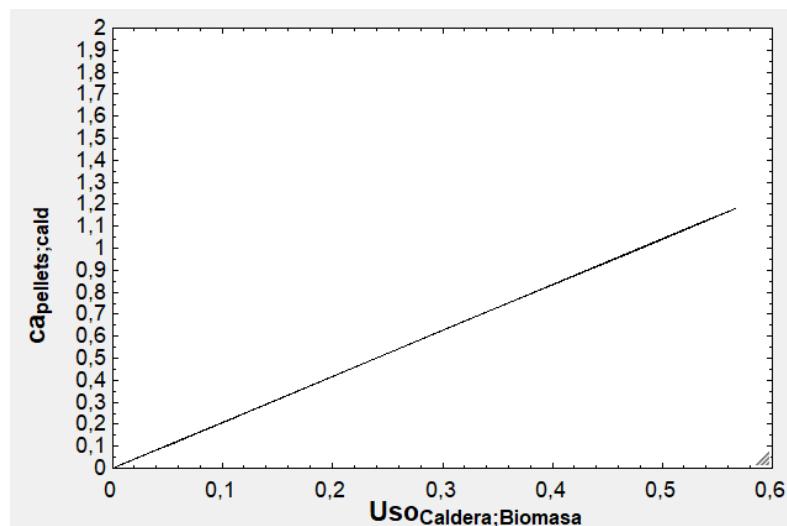


Figura 63 Gráfica comparativa cantidad de pellets y porcentaje uso Caldera, 5 de Enero.

6. Análisis Ambiental

En este apartado voy a hacer un pequeño cálculo para estimar las emisiones de CO2 de la vivienda unifamiliar seleccionada en los distintos días de simulación del apartado anterior. Lo hacemos para este periodo de tiempo ya que sabemos exactamente qué porcentaje de la demanda energética se encarga de cubrir cada equipo. Este dato es fundamental ya que evidentemente las emisiones de kgCO2 eq de una caldera de pellets son muy inferiores a las de nuestra bomba de calor.

1. Emisiones kgCO2 eq, 5 de Enero.

Lo primero que tengo que calcular son los kWh que consume la bomba de calor durante todo el día y la cantidad de kg de pellets que se usan para ese día de simulación. Esta tarea se hace muy sencilla debido a que en las tablas del apartado anterior tenemos dichos valores desglosados por horas. Lo único que debo hacer es sumar los valores de cada fila.

Los kWh que consume nuestra bomba de calor durante todo el día es la suma de las filas de “Qcond” y al dividirlo por el COP nos sale un consumo igual a 35,134 kWh.

Los kg de pellets que consume nuestra caldera de biomasa durante todo el día es la suma de las filas de “ca_pellets” y el resultado es igual a 6,494 kg de pellets.

Para pasar los kWh a kgCO2 eq he consultado una calculadora de ECODES, para que me realice una conversión realista y actualizada. ECODES es una organización sin ánimo de lucro española cuyos objetivos se alinean con la agenda 2030 y sus objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

Si nosotros introducimos los 35,134 kWh obtenemos un total de 14,391 kg de CO2 eq que emite ese día nuestra vivienda unifamiliar debido a la contribución de nuestra bomba de calor.

Para la caldera de pellets lo que vamos a hacer es pasar los kilos de biomasa a toneladas y multiplicarlo por 48 kgCO2 eq/t.

El resultado del cálculo nos sale un total de 0,3117 kgCO2 eq.

Como se puede observar la principal ventaja de hibridar nuestro sistema de bomba de calor con una caldera de biomasa es que las emisiones de CO2 se reducen considerablemente. Ya que apenas se emite CO2 con la caldera de pellets.

A continuación vamos a repetir el proceso para los dos días restantes que he simulado en el apartado anterior.

2. Emisiones kgCO2 eq, 5 de Marzo.

Los kWh que consume nuestra bomba de calor durante todo el día es la suma de las filas de “Qcond” y al dividirlas por el COP es igual a 16,582 kWh.

Los kg de pellets que consume nuestra caldera de biomasa durante todo el día es la suma de las filas de “ca_pellets” y el resultado es igual a 0,631 kg de pellets.

Si volvemos a hacer la conversión como hemos hecho con el día anterior, me dan los siguientes resultados:

Bomba calor emite 6,806 kgCO2 eq.

Caldera de biomasa emite 0,0303 kgCO2 eq.

Es lógico obtener esta disminución de emisiones de CO2 ya que a menor demanda de calefacción las emisiones lógicamente decrecen.

3. Emisiones kgCO2 eq, 6 de Diciembre.

Los kWh que consume nuestra bomba de calor durante todo el día es la suma de las filas de “Qcond” y al dividirlas por el COP el resultado es igual a 31,280 kWh.

Los kg de pellets que consume nuestra caldera de biomasa durante todo el día es la suma de las filas de “ca_pellets” y el resultado es igual a 3,75 kg de pellets.

Si volvemos a hacer la conversión como hemos hecho con el día anterior, me dan los siguientes resultados:

Bomba calor emite 12,833 kgCO2 eq.

Caldera de biomasa emite 0,18 kgCO2 eq.

Podemos concluir con los resultados obtenidos que es fundamental contar con la caldera de biomasa para hacer una reducción significativa de nuestras emisiones de CO2 y así ajustarnos a los objetivos que nos imponen la Unión Europea.

Si quisiéramos saber las emisiones anuales deberíamos hacer el cálculo de cada uno de los días y sumarlos todos. Para tener una estimación anual de cuanto sería la emisión de CO2 en nuestra vivienda unifamiliar, voy a hacer una media de los tres días estudiados anteriormente y multiplicarlo por los días del año que tenemos demanda de calefacción.

El resultado del cálculo es igual a 2418,64 kgCO2 eq.

7. Análisis Económico

El estudio económico que voy a realizar se va a centrar en analizar dos tipos de costes muy diferenciados. El coste de inversión, donde se engloba todo el desembolso inicial que se debe realizar para adquirir los equipos que van a constituir nuestro sistema de calefacción. Es decir, los equipos que conforman la bomba de calor y la caldera de pellets. Y el otro coste que vamos a analizar es el coste de operación, donde en este apartado agruparemos el coste de la electricidad que usa nuestra bomba de calor y el precio de los pellets que tenemos que utilizar para el funcionamiento de nuestra caldera de biomasa.

-Coste de inversión.

En mi sistema de calefacción he decidido implementar una caldera de pellets de 10 kW de potencia, e investigando en distintas páginas de ventas de este tipo de producto el precio medio de estos equipos ronda entre 3000 y 5000 €. La caldera que he seleccionado es una caldera BIOCLASS HM 10 KW DE PELLET. DOMUSA. TBIO000073 [19]. Cuyo precio es de 3158,10€. Para los equipos que conforman nuestra bomba de calor he decidido seleccionar los productos que nos ofrece el catálogo de Daikin [20]. Esta es una empresa japonesa especializada en la fabricación de aire acondicionado y aerotermia. Debemos seleccionar la unidad interior, la unidad exterior y el acumulador o deposito. Los equipos que he elegido son los siguientes:

- Unidad exterior: ERHQ011BV3 con un precio de 3384 €.
- Unidad interior: EHBX11CB3V con un precio de 2435 €.
- Acumulador: EKHWS150B3V3 (150 litros) con un precio de 1390 €.

En total el desembolso de inversión inicial sería de 10367,1€, precio que es bastante elevado pero que a la larga se compensa por el gran rendimiento energético que nos ofrece estos equipos.

-Costes de operación.

Voy a calcular en este apartado los costes de operación para los tres días a los que he realizado el análisis ambiental.

- Costes de operación, 5 de Enero.

Para el cálculo de los costes de operación lo primero que tengo que hacer es consultar el precio del kWh en la página oficial de Red Eléctrica de España (REE), debido a que el precio del kWh cambia cada día y cada hora. Vamos a coger el precio del kWh del año 2022 para tener los precios de los días que estamos analizando.

Hora del día	Precio (€/kWh)	Consumo (kWh)	Coste (€)
1:00	0,14969	1,07	0,16
2:00	0,12537	1,19	0,15
3:00	0,11473	1,29	0,15
4:00	0,11900	1,39	0,17
5:00	0,13839	1,46	0,20
6:00	0,22558	1,54	0,35
7:00	0,26278	1,60	0,42
8:00	0,29049	1,60	0,46
9:00	0,29289	1,60	0,47
10:00	0,35570	1,60	0,57
11:00	0,34834	1,60	0,56
12:00	0,34565	1,60	0,55
13:00	0,34263	1,60	0,55
14:00	0,27142	1,60	0,43
15:00	0,27727	1,60	0,44

16:00	0,28609	1,60	0,46
17:00	0,29159	1,60	0,47
18:00	0,37789	1,60	0,60
19:00	0,40858	1,60	0,65
20:00	0,39905	1,60	0,64
21:00	0,37209	1,60	0,60
22:00	0,29024	1,60	0,46
23:00	0,28357	1,60	0,45

Figura 64 Tabla costes de operación bomba de calor desglosado, 5 de Enero.

En total, el precio que tendría que pagar por la electricidad que consume mi bomba de calor durante el día 5 de enero sería de 9,97€. Si a esto le sumamos el precio de los pellets que se usan a lo largo del día (6,494 kg de pellets por su precio que es de 7,79€ una bolsa de 15 kg), que sería de 3,4€. En total nos sale un coste de operación de 13,37€.

- Costes de operación, 5 de Marzo.

Vamos a repetir el mismo procedimiento que con el día anteriormente analizado.

Hora del día	Precio (€/kWh)	Consumo (kWh)	Coste (€)
1:00	0,46951	0,17	0,08
2:00	0,46604	0,28	0,13
3:00	0,44571	0,36	0,16

4:00	0,45633	0,45	0,21
5:00	0,46485	0,56	0,26
6:00	0,48450	0,66	0,32
7:00	0,48784	0,73	0,35
8:00	0,47036	1,60	0,75
9:00	0,45532	1,60	0,73
10:00	0,44611	1,60	0,71
11:00	0,44295	1,52	0,67
12:00	0,44117	1,26	0,56
13:00	0,44750	1,02	0,45
14:00	0,44548	0,76	0,34
15:00	0,38795	0,56	0,22
16:00	0,42993	0,39	0,17
17:00	0,47988	0,28	0,13
18:00	0,50732	0,26	0,13
19:00	0,51099	0,36	0,18
20:00	0,49826	0,38	0,19
21:00	0,48749	0,49	0,24

22:00	0,47836	0,61	0,29
23:00	0,45884	0,70	0,32

Figura 65 Tabla costes de operación bomba de calor desglosado, 5 de Marzo.

En total, el precio que tendría que pagar por la electricidad que consume mi bomba de calor durante el día 5 de marzo sería de 7,6€. Si a esto le sumamos el precio de los pellets que se usan a lo largo del día (0,631 kg de pellets por su precio que es de 7,79€ una bolsa de 15 kg), que sería de 0,33€. En total nos sale un coste de operación de 7,93€.

- Costes de operación, 6 de Diciembre.

Vamos a repetir el mismo procedimiento que con el día anteriormente analizado.

Hora del día	Precio (€/kWh)	Consumo (kWh)	Coste (€)
1:00	0,38510	0,73	0,28
2:00	0,39440	0,88	0,35
3:00	0,40441	0,95	0,38
4:00	0,41055	1,06	0,44
5:00	0,41976	1,18	0,50
6:00	0,40664	1,25	0,51
7:00	0,38255	1,34	0,51
8:00	0,36770	1,60	0,59
9:00	0,35391	1,60	0,57

10:00	0,34913	1,60	0,56
11:00	0,33977	1,60	0,54
12:00	0,34288	1,60	0,55
13:00	0,34807	1,60	0,56
14:00	0,35055	1,60	0,56
15:00	0,35284	1,42	0,50
16:00	0,37394	1,26	0,47
17:00	0,36937	1,24	0,46
18:00	0,37685	1,34	0,50
19:00	0,39105	1,40	0,55
20:00	0,40539	1,39	0,56
21:00	0,39881	1,48	0,59
22:00	0,38350	1,56	0,60
23:00	0,37622	1,60	0,60

Figura 66 Tabla costes de operación bomba de calor desglosado, 6 de Diciembre.

En total, el precio que tendría que pagar por la electricidad que consume mi bomba de calor durante el día 6 de diciembre sería de 11,72€. Si a esto le sumamos el precio de los pellets que se usan a lo largo del día (3,75 kg de pellets por su precio que es de 7,79€ una bolsa de 15 kg), que sería de 1,95€. En total nos sale un coste de operación de 13,67€.

Si queremos saber el coste anual que nos genera nuestra bomba de calor voy a repetir el proceso que he llevado a cabo en el análisis de emisiones. Para ello tomo los tres días que he analizado como días tipo y voy hacer la media del coste de los tres días. Para posteriormente multiplicarlo por el número de días que tengo que tener activada mi bomba de calor. Esta es una estimación orientativa ya que para hacerlo con la mayor precisión posible debería hacer el proceso que he desarrollado en este apartado para todos los días del año y no solo para tres días tipo. El resultado del cálculo nos sale un coste anual de 1400,4 €. Cabe remarcar que afortunadamente el precio actual de la electricidad no es el que teníamos en 2022, donde teníamos algunas horas que el precio de la energía era de 0,40 €/ kWh. Esta subida en el precio de la energía fue producida por el inicio de la guerra en Ucrania. Por lo que la instalación es mucho más rentable de lo que parece.

8. Conclusiones

El presente TFG nos ha servido para cumplir nuestro objetivo de analizar la integración de bombas de calor con caldera de biomasa en una vivienda unifamiliar. Esto es una de los muchos sistemas que disponemos en el mercado para el acondicionamiento térmico de nuestras viviendas y que antes de realizar ningún tipo de análisis era el más recomendado, ya que contaba con unos rendimientos muy elevados y bajas emisiones de CO₂. Nuestro objetivo era comprobar la eficacia de estos equipos y analizar si realmente son tan indispensables para conseguir los objetivos y directrices que nos marca la Unión Europea. Pero antes de eso hemos comprobado también la eficacia en la evolución de la normativa española para el ahorro energético en el sector inmobiliario. Ya que hemos analizado las tres normativas que regulan los aspectos energéticos de los edificios desde 1981 hasta la actualidad y hemos comprobado que las mejoras que se han ido implementando durante todos estos años han conseguido disminuir las demandas energéticas que requiere una misma vivienda. Esto se traduce directamente en un descenso tanto de las emisiones de CO₂ como en el precio de la factura de la luz. Y actualmente tanto el cambio climático producido por las emisiones de gases de efecto invernadero (como el CO₂) como el elevado precio de los combustibles fósiles y del kWh son problemas de primer orden en nuestra sociedad. Hemos diseñado una bomba de calor en la que hemos utilizado varios fluidos refrigerantes para encontrar aquel que nos permitiera obtener un rendimiento más elevado en nuestro equipo. Al final el fluido que ha conseguido obtener un COP más elevado en nuestra bomba de calor ha sido el R-290 con un COP de 3,484. Siendo este un rendimiento muy bueno para nuestro equipo y comprobando que las bombas de calor tienen rendimientos infinitamente mejores que una caldera convencional, la cual su rendimiento suele oscilar entre un 70-80%. Pero no solo la bomba de calor cuenta con un buen rendimiento, he modelado como equipo auxiliar una caldera de biomasa cuyo combustible son pellets y he obtenido rendimientos sobre el PCI del 93,94%. Pero en el análisis económico y ambiental es donde realmente ha brillado la decisión de hibridar nuestra bomba de calor con la caldera de biomasa, ya que hemos obtenido emisiones bajísimas de CO_{2eq} con nuestra caldera de biomasa y los costes de operación también eran extremadamente bajos en comparación a los de la bomba de calor. La única desventaja que he podido apreciar es que al analizar los costes de inversión, estos ascienden a un total de 10367,1€. Precio que es bastante elevado y que seguramente a muchas familias les costaría plantearse hacer esta inversión inicial. En cualquier caso, es posible que la

biomasa sea de disposición gratuita en entornos rurales, y sirve de apoyo en los periodos donde la HP no puede operar en condiciones óptimas. Pero tras haber realizado este TFG he podido comprobar el potencial que dispone este sistema de tratamiento térmico y viendo como están actualmente los precios de los combustibles fósiles y de las energías recomiendo la integración de las bombas de calor con caldera de biomasa en el ámbito de las viviendas.

9. Bibliografía

- [1] Presidencia del Gobierno (1979). Real Decreto 2429/1979, de 6 de julio, por el que se aprueba la norma básica de edificación NBE-CT-79, sobre condiciones térmicas en los edificios. BOE nº253 de 22-10-79.
- [2] Presidencia del Gobierno (1975). Decreto 1490/1975, de 12 de junio, por el que se establecen medidas a adoptar en las edificaciones con objeto de reducir el consumo de energía. BOE nº165, de 12-06-1975.
- [3] Ministerio de Fomento (2006). Documento Básico HE - Ahorro de energía. Febrero 2006.
- [4] Ministerio de Fomento (2019). Documento Básico HE - Ahorro de energía. Diciembre 2019.
- [5] Unión Europea (2010). Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios. Official Journal L 153, 16/06/2010, 13-35.
- [6] Ministerio de Fomento (2017). Documento Básico HE - Ahorro de energía.
- [7] J.J. Guo, J.Y. Wu , R.Z. Wang, S. Li. Experimental research and operation optimization of an air-source heat pump water heater. *Applied Energy* 88 (2011) 4128–4138.
- [8] Chi-Chuan Wang a, Jane-Sunn Liaw, Bing-Chwen Yang. Airside performance of herringbone wavy fin-and-tube heat exchangers – data with larger diameter tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 (2011) 1024–1029.
- [9] Weishi Deng, Jianlin Yu. Simulation analysis on dynamic performance of a combined solar/air dual source heat pump water heater. *Energy Conversion and Management* 120 (2016) 378–387.
- [10] Zuqiang Li, Xinghua Huang. Simulation analysis on operation performance of a hybrid heat pump system integrating photovoltaic/thermal and air source. *Applied Thermal Engineering* 200 (2022) 117693.
- [11] Yongcai Li, Wuyan Li, Zongsheng Liu, Jun Lu, Liyue Zeng, Lulu Yang, Ling Xie. Theoretical and numerical study on performance of the air-source heat pump system in Tibet. *Renewable Energy* 114 (2017) 489-501.
- [12] Fabián Correa, Cristian Cuevas. Air-water heat pump modelling for residential heating and domestic hot water in Chile. *Applied Thermal Engineering* 143 (2018) 594-606.

- [13] M. Fatouh, E. Elgendi. Experimental investigation of a vapor compression heat pump used for cooling and heating applications. Energy 36 (2011) 2788-2795.
- [14] Di Wu, Bin Hu, R.Z. Wang. Vapor compression heat pumps with pure Low-GWP refrigerants.
- [15] Renewable and Sustainable Energy Reviews 138 (2021) 110571.
- [16] Amaya Martinez. Apuntes Bomba de Calor. Asignatura Calor y Frío Industrial Ingeniería Mecánica EINA.
- [17] Esteban González, Irene. TFG: “Análisis y caracterización de la combustión de pélets en una caldera Solarfocus TII30 de llama invertida”.
- [18] Emisiones kWh, <https://ecodes.org/tiempo-de-actuar/hogares-sostenibles/ahorro-energetico/calculadora-electricidad>.
- [19] Precio caldera de pellets, <https://telecalefaccion.com/Calderas-Pellets-Biomasa-Lena-Calidad-y-el-mejor-Precio/Calderas-de-Pellets-de-Calidad/caldera-bioclass-hm-10-kw-de-pellet-limpieza-automatica-domusa-tbio000073>.
- [20] Catálogo Daikin, Tarifa-Daikin-2019-Calefaccion.
- [21] Precio kWh electricidad. Disponible en: <https://www.esios.ree.es/es/pvpc>.
- [22] Precio pellets. Disponible en: <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/biomasa/precios-especiales-en-sacos-de-pellets.html>.
- [23] Información energética extraída de la página Iberdrola. Disponible en: <https://www.iberdrola.es/>.
- [24] Segmentación del parque residencial de viviendas en España en clústeres tipológicos. Disponible en: <https://www.mitma.es/>.
- [25] Apuntes Calor y Frío Industrial, Ingeniería Mecánica, EINA. Profesora: Amaya Martínez.

10. Índice de figuras

Figura 1 Consumo final energía hogares España 1990-2021. Elaboración propia con datos de IDAE.	5
Figura 2 Porcentajes de Demanda anual de energía final en España. Iberdrola [23].	5
Figura 3 Fragmento del CTE DB-HE 2019[4], HE 5.	6
Figura 4 Grafica comparativa de emisiones de CO2. Estudio realizado con los datos empresa Iberdrola [23].	6
Figura 5 Interfaz DesignBuilder muestra opciones para introducción datos geográficos.	8
Figura 6 Interfaz DesignBuilder muestra vista 3D Vivienda.	9
Figura 7 Interfaz DesignBuilder muestra vista Garaje Vivienda.	10
Figura 8 Interfaz DesignBuilder muestra vista Planta Alta Vivienda.	10
Figura 9 Interfaz DesignBuilder muestra vista Planta Baja Vivienda.	11
Figura 10 Interfaz DesignBuilder muestra vista Cubierta Vivienda.	11
Figura 11 Interfaz DesignBuilder muestra Actividad edificio.	12
Figura 12 Interfaz DesignBuilder muestra Aberturas edificio.	13
Figura 13 Interfaz DesignBuilder muestra Cerramientos modificados edificio.	14
Figura 14 Tabla valores permeabilidad huecos distintas normativas.	15
Figura 15 Tabla valores relación cambio de aire distintas normativas.	15
Figura 16 Tabla valores ventilación mecánica distintas normativas.	16
Figura 17 Interfaz DesignBuilder muestra valores puentes térmicos CTE DB-HE 2019[4].	17
Figura 18 Interfaz DesignBuilder muestra valores puentes térmicos CTE DB-HE 2006[3].	17
Figura 19 Interfaz DesignBuilder muestra valores puentes térmicos NBE-CT-1979[1].	17
Figura 20 Gráfica Demanda anual CTE DB-HE 2019[4].	19
Figura 21 Gráfica Demanda mensual CTE DB-HE 2019[4].	19
Figura 22 Gráfica Demanda horaria CTE DB-HE 2019[4].	20
Figura 23 Gráfica Consumo anual CTE DB-HE 2019[4].	20
Figura 24 Gráfica Consumo mensual CTE DB-HE 2019[4].	21
Figura 25 Gráfica Consumo horario CTE DB-HE 2019[4].	21
Figura 26 Gráfica Demanda anual CTE DB-HE 2006[3].	22

Figura 27 Gráfica Demanda mensual CTE DB-HE 2006[3].	22
Figura 28 Gráfica Demanda horaria CTE DB-HE 2006[3].	23
Figura 29 Gráfica Consumo anual CTE DB-HE 2006[3].	23
Figura 30 Gráfica Consumo mensual CTE DB-HE 2006[3].	24
Figura 31 Gráfica Consumo horario CTE DB-HE 2006[3].	24
Figura 32 Gráfica Demanda anual NBE-CT-1979[1].	25
Figura 33 Gráfica Demanda mensual NBE-CT-1979[1].	25
Figura 34 Gráfica Demanda horaria NBE-CT-1979[1].	26
Figura 35 Gráfica Consumo anual NBE-CT-1979[1].	26
Figura 36 Gráfica Consumo mensual NBE-CT-1979[1].	27
Figura 37 Gráfica Consumo horario NBE-CT-1979[1].	27
Figura 38 Tabla consumos y demandas.	28
Figura 39 Representación modo calefacción bomba de calor. Fuente: Apuntes Calor y Frío Industrial [25].	30
Figura 40 Representación modo refrigeración bomba de calor. Fuente: Apuntes Calor y Frío Industrial [25].	30
Figura 41 Tabla propiedades ciclo simplificado R134-a.	33
Figura 42 Gráfica ciclo simplificado R134-a.	33
Figura 43 Propiedades ciclo R134-a.	35
Figura 44 Gráfica ciclo R134-a.	35
Figura 45 Unidades de trabajo EES.	36
Figura 46 Modelo compresor EES.	36
Figura 47 Ecuaciones evaporador EES.	37
Figura 48 Ecuaciones cálculo alfa_o_eva EES.	38
Figura 49 Ecuaciones cálculo alfa_sh_eva EES.	39
Figura 50 Ecuaciones cálculo alfa_tp_eva EES.	39
Figura 51 Ecuaciones condensador EES.	40
Figura 52 Ecuaciones cálculo alfa_w EES.	41
Figura 53 Ecuaciones cálculo alfa_sh_cond EES.	41
Figura 54 Ecuaciones cálculo alfa_sc_cond EES.	42
Figura 55 Ecuaciones cálculo alfa_tp_cond EES.	42
Figura 56 Reacción química Caldera Biomasa.	43
Figura 57 Esquema instalación térmica.	44
Figura 58 Tabla resultados COP distintos refrigerantes.	45

Figura 59 Tabla resultados simulación R290, 5 de Enero.	46
Figura 60 Tabla resultados simulación R290, 5 de Marzo.	47
Figura 61 Tabla resultados simulación R290, 6 de Diciembre.	47
Figura 62 Gráfica comparativa COP y porcentaje uso Bomba, 5 de Marzo.	48
Figura 63 Gráfica comparativa cantidad de pellets y porcentaje uso Caldera, 5 de Enero.	
	49
Figura 64 Tabla costes de operación bomba de calor desglosado, 5 de Enero.	54
Figura 65 Tabla costes de operación bomba de calor desglosado, 5 de Marzo.	56
Figura 66 Tabla costes de operación bomba de calor desglosado, 6 de Diciembre.	
	57

Anexos

Índice de anexos

1. Cerramientos de la envolvente térmica.	68
1.1. Valores límite de transmitancia.	68
1.2. Soluciones constructivas.	69
2. Permeabilidad al aire de la envolvente térmica.	72
2.1. Permeabilidad de los huecos.	72
2.2. Relación del cambio de aire.	72
3. Ventilación mecánica.	73
4. Puentes térmicos.	74
5. Cargas internas.	78
6. Valores de transmitancia para los Cerramientos según distintas versiones de la normativa.	79
7. Códigos EES modelos simplificados.	88
7.1. Refrigerante R134-a	88
7.2. Refrigerante R-22	89
7.3. Refrigerante R-32	90
7.4. Refrigerante R-290	91
7.5. Refrigerante R-410-a	92
8. Resultados bomba de calor EES modelos completo.	93
8.1. Refrigerante R134-a	93
8.2. Refrigerante R-22	99
8.3. Refrigerante R-32	101
8.4. Refrigerante R-290	103
8.5. Refrigerante R-410-a	105
9. Modelado caldera de biomasa.	108
10. Características comerciales equipos seleccionados.	110

1. Cerramientos de la envolvente térmica.

1.1. Valores límite de transmitancia.

Valores de transmitancia de los cerramientos según NBE-CT-1979(1) en W/m²K:

ZONA CLIMÁTICA		Teruel = Zona "Z"
CERRAMIENTOS EXTERIORES	Cubiertas	0,7
	Fachadas ligeras (<200 kg/m ²)	1,2
	Fachadas pesadas (>200 kg/m ²)	1,4
	Forjados sobre espacio abierto	0,7
CERRAMIENTOS CON LOCALES NO CALEFACTADOS	Paredes	1,6
	Suelos o techos	1,2

Valores de transmitancia de los huecos según NBE-CT-1979(1) en W/m²K:

Tipo de acristalamiento	Tipo de carpintería	Inclinación del hueco con respecto a la horizontal	
		≥60°	<60°
Sencillo	Madera	5,0	5,5
	Metálica	5,8	6,5

Valores de transmitancia de los cerramientos y huecos según CTE DB-HE 2006(3) en W/m²K:

Cerramientos y particiones interiores	Zona climática invierno				
	A E	B	C	D	
Muros de fachada, particiones interiores en contacto con espacios no habitables, primer metro del perímetro de suelos apoyados sobre el terreno y primer metro de muros en contacto con el terreno	1,22	1,07	0,95	0,86	0,74
Suelos	0,69	0,68	0,65	0,64	0,62
Cubiertas	0,65	0,59	0,23	0,49	0,46
Vidrios y marcos	5,70	5,70	4,40	3,50	3,10
Medianeras	1,22	1,07	1,00	1,00	1,00

Valores de transmitancia de los cerramientos y huecos según CTE DB-HE 2019(4) en W/m²K:

Elemento	α E	Zona climática invierno			
		A	B	C	D
Muros y suelos en contacto con el aire exterior (U_s, U_M)	0,80	0,70	0,56	0,49	0,41
Cubiertas en contacto con el aire exterior (U_c)	0,55	0,50	0,44	0,40	0,35
Muros, suelos y cubiertas en contacto con espacios no habitables o con el terreno (U_T) Medianerías o particiones interiores pertenecientes a la envolvente térmica (U_{MD})	0,90	0,80	0,75	0,70	0,65
Huecos (conjunto de marco, vidrio y, en su caso, cajón de persiana) (U_H)	3,2	2,7	2,1	1,8	1,8
Puertas con superficie semitransparente igual o inferior al 50%	5,7				

Valores de transmitancia de las particiones interiores según CTE DB-HE 2019(4) en W/m²K:

Entre unidades del mismo uso	Tipo de elemento	Zona climática invierno			
		α E	A	B	C
	Particiones horizontales	1,90	1,80	1,55	1,35
	Particiones verticales	1,40	1,40	1,20	1,20

1.2. Soluciones constructivas.

Muro exterior (de fuera hacia dentro)				
Material	Espesor (m)	Conductividad (W/m K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kgK)
½ pie LP métrico o catalán 40mm<G<60mm	0,115	0,667	1140	1000
EPS Poliestireno Expandido	VARIABLE	0,037	30	1000
Tabique de LH sencillo 40mm<E<60mm	0,04	0,445	1000	1000
Enlucido de yeso 1000<d<130	0,02	0,57	1150	1000

Cubierta (de arriba abajo)				
Material	Espesor (m)	Conductividad (W/m K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kgK)
Plaqueta o baldosa cerámica	0,02	1	2000	800
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido d>2000	0,02	1,8	2100	1000
Tabique de LH sencillo Gran Formato 40mm<E<60mm	0,04	0,228	670	1000
EPS Poliestireno Expandido	VARIABLE	0,037	30	1000
Hormigón armado 2300<d<2500	0,15	2,3	2400	1000
Enlucido de yeso 1000<d<130	0,02	0,57	1150	1000

Forjado interior (de arriba abajo)				
Material	Espesor (m)	Conductividad (W/m K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kgK)
Plaqueta o baldosa cerámica	0,02	1	2000	800
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido d>2000	0,02	1,8	2100	1000
EPS Poliestireno Expandido	VARIABLE	0,037	30	1000
FU entrevigado cerámico – canto 250mm	0,25	0,908	1220	1000
Enlucido de yeso 1000<d<130	0,02	0,57	1150	1000

Solera en contacto con terreno (de arriba abajo)				
Material	Espesor (m)	Conductividad (W/m K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kgK)
Plaqueta o baldosa cerámica	0,02	1	2000	800
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido d>2000	0,02	1,8	2100	1000
EPS Poliestireno Expandido	VARIABLE	0,037	30	1000
Hormigón armado 2300<d<2500	0,2	2,3	2400	1000

Medianeras (de fuera hacia dentro)				
Material	Espesor (m)	Conductividad (W/m K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kgK)
½ pie LP métrico o catalán 40mm<G<60mm	0,115	0,667	1140	1000
EPS Poliestireno Expandido	VARIABLE	0,037	30	1000
Tabique de LH sencillo 40mm<E<60mm	0,04	0,445	1000	1000
Enlucido de yeso 1000<d<130	0,02	0,57	1150	1000

Forjado interior entre zonas con distinto uso (de arriba a abajo)				
Material	Espesor (m)	Conductividad (W/m K)	Densidad (kg/m³)	Calor específico (J/kgK)
Plaqueta o baldosa cerámica	0,02	1	2000	800
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido d>2000	0,02	1,8	2100	1000
EPS Poliestireno Expandido	VARIABLE	0,037	30	1000
FU entrevigado cerámico – canto 250mm	0,25	0,908	1220	1000
Enlucido de yeso 1000<d<130	0,02	0,57	1150	1000

Tabiquería interior entre zonas con distinto uso (de fuera hacia dentro)				
Material	Espesor (m)	Conductividad (W/m K)	Densidad (kg/m³)	Calor específico (J/kgK)
½ pie LP métrico o catalán 40mm<G<60mm	0,115	0,667	1140	1000
EPS Poliestireno Expandido	VARIABLE	0,037	30	1000
Tabique de LH sencillo 40mm<E<60mm	0,04	0,445	1000	1000
Enlucido de yeso 1000<d<130	0,02	0,57	1150	1000

NBE-CT-1979 Periodo de construcción 1981-2007	Solución constructiva	Zona climática invierno			
		A	B	C	D
	Vidrio sencillo Marco metálico	U		5,8	
		g		0,77	

CTE DB-HE 2006 Periodo de construcción 2008-2019	Solución constructiva	Zona climática invierno					
		A	B	C	D		
	Vidrio doble Marco metálico con RPT	U	5,7	5,70	4,40	3,50	3,10
		g			0,70		

CTE DB-HE 2019 Periodo de construcción 2020-Act	Solución constructiva	Zona climática invierno					
		A	B	C	D		
	Vidrio doble bajo emisivo Marco PVC	U	2,7	2,3	2,1	1,8	1,8
		g			0,60		

2. Permeabilidad al aire de la envolvente térmica.

2.1. Permeabilidad de los huecos.

Permeabilidad al aire de los huecos según normativa, en m³/hm²:

	Zona climática invierno				
	A	B	C	D	
NBE-CT-1979 Periodo de construcción 1981-2007	50	50	27	27	27
CTE DB-HE 2006 Periodo de construcción 2008-2019	50	50	27	27	27
CTE DB-HE 2019 Periodo de construcción 2020-Act	≤ 27	≤ 27	≤ 9	≤ 9	≤ 9

2.2. Relación del cambio de aire.

$$n_{50} = 0,625 \cdot (C_0 \cdot A_0 + C_h \cdot A_h) / V$$

Donde:

V = volumen interno de la envolvente térmica, en m³.

C₀ = coeficiente de caudal de aire de la parte opaca de la envolvente térmica, expresado para 100 Pa, en m³/hm², obtenido de la tabla a-Anejo H, CTE DB-HE 2019(4).

A₀ = superficie de la parte opaca de la envolvente térmica, en m². Según la Guía de Aplicación CTE DB-HE 2019(4), se tienen en cuenta únicamente las superficies opacas de la envolvente que estén en contacto con el aire exterior (es decir, se excluyen los elementos en contacto con el terreno y las medianeras).

C_h = permeabilidad de los huecos de la envolvente térmica, expresada para 100 Pa, en m³/hm².

A_h = superficie de los huecos de la envolvente térmica, en m².

3. Ventilación mecánica.

El caudal mínimo de ventilación exigido en cada normativa se define en el Documento Básico HS Salubridad, en la Sección HS 3: Calidad del aire interior. Anteriormente a la entrada en vigor del CTE, no existía dicha exigencia. Por ello, en el caso del periodo de construcción 1981-2007, se podrían aplicar los valores del CTE-DB-HS 2006(3). Para el resto de los periodos de construcción considerados, se toman los valores mínimos de ventilación establecidos en el CTE-DB-HS 2017 que coinciden con los del CTE-DB-HS 2019(4).

En la simulación de todos los casos de estudio se considera ventilación nocturna en verano (junio a septiembre) de 4 ren/h.

4. Puentes térmicos.

Frente de forjado		
Sin continuidad de aislamiento	<u>NBE-CT-1979</u> Periodo de construcción 1981-2007	Ψ_e [W/mK]
		A -0,01
		B -0,01
		C 0,02
		D 0,02
	E 0,02	
Con continuidad de aislamiento	<u>CTE DB-HE 2006</u> Periodo de construcción 2008-2019	A 0,032
		B 0,032
		C 0,025
		D 0,023
		E 0,02
	<u>CTE DB-HE 2019</u> Periodo de construcción 2020-Act	A 0,017
		B 0,013
		C 0,011
		D 0,007
		E 0,004

Dinteles		
Sin continuidad de aislamiento	<u>NBE-CT-1979</u> Periodo de construcción 1981-2007	Ψ_e [W/mK]
		A 0,4
		B 0,4
		C 0,45
		D 0,45
		E 0,45
Con continuidad de aislamiento	<u>CTE DB-HE 2006</u> Periodo de construcción 2008-2019	A 0,15
		B 0,15
		C 0,125
		D 0,123
		E 0,11
	<u>CTE DB-HE 2019</u> Periodo de construcción 2020-Act	A 0,119
		B 0,114
		C 0,11
		D 0,104
		E 0,098

Cubierta plana		
Sin continuidad de aislamiento	<u>NBE-CT-1979</u> Periodo de construcción 1981-2007	Ψ_e [W/mK]
		A -0,5
		B -0,5
		C 0,02
		D 0,02
	E 0,02	
Con continuidad de aislamiento	<u>CTE DB-HE</u> <u>2006</u> Periodo de construcción 2008-2019	A -0,025
		B -0,025
		C 0,023
		D 0,025
		E 0,04
	<u>CTE DB-HE</u> 2006	A 0,038
		B 0,052
		C 0,06
		D 0,06
		E 0,06

Esquinas salientes		
Sin continuidad de aislamiento	<u>NBE-CT-1979</u> Periodo de construcción 1981-2007	Ψ_e [W/mK]
		A -0,6
		B -0,6
		C -0,5
		D -0,5
	E -0,5	
Con continuidad de aislamiento	<u>CTE DB-HE</u> <u>2006</u> Periodo de construcción 2008-2019	A -0,35
		B -0,35
		C -0,3
		D -0,28
		E -0,24
	<u>CTE DB-HE</u> <u>2019</u> Periodo de construcción 2020-Act	A -0,22
		B -0,18
		C -0,15
		D -0,13
		E -0,12

Solera en contacto con terreno		
Sin continuidad de aislamiento	<u>NBE-CT-1979</u> Periodo de construcción 1981-2007	Ψ_e [W/mK]
		A -0,13
		B -0,13
		C -0,05
		D -0,05
		E -0,05
Con continuidad de aislamiento	<u>CTE DB-HE 2006</u> Periodo de construcción 2008-2019	A -0,06
		B -0,06
		C -0,055
		D -0,05
		E -0,04
	<u>CTE DB-HE 2019</u> Periodo de construcción 2020-Act	A -0,03
		B -0,017
		C 0,00
		D 0,009
		E 0,018

Alfeizar		
Sin continuidad de aislamiento	<u>NBE-CT-1979</u> Periodo de construcción 1981-2007	Ψ_e [W/mK]
		A 0,11
		B 0,11
		C 0,13
		D 0,13
		E 0,13
Con continuidad de aislamiento	<u>CTE DB-HE</u> <u>2006</u> Periodo de construcción 2008-2019	A 0,135
		B 0,135
		C 0,125
		D 0,123
		E 0,12
	<u>CTE DB-HE</u> <u>2019</u> Periodo de construcción 2020-Act	A 0,09
		B 0,09
		C 0,09
		D 0,087
		E 0,084

Jambas		
Sin continuidad de aislamiento	<u>NBE-CT-1979</u> Periodo de construcción 1981-2007	Ψ_e [W/mK]
		A 0,42
		B 0,42
		C 0,45
		D 0,45
	E 0,45	
Con continuidad de aislamiento	<u>CTE DB-HE</u> <u>2006</u> Periodo de construcción 2008-2019	A 0,17
		B 0,17
		C 0,15
		D 0,14
		E 0,12
	<u>CTE DB-HE</u> <u>2019</u> Periodo de construcción 2020-Act	A 0,041
		B 0,031
		C 0,024
		D 0,017
		E 0,014

5. Cargas internas.

Cargas internas asociadas al perfil de uso de espacios en uso residencial privado:

Carga Interna (W/m ²)		Horario (semana tipo)					
		0:00 - 6:59	7:00 - 14:59	15:00 - 17:59	18:00 - 18:59	19:00 - 22:59	23:00 - 23:59
Ocupación (Sensible)	L	2,15	0,54	1,08	1,08	1,08	2,15
	S y F						2,15
Periodo de construcción 2020-Act		2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	
	L	1,36	0,34	0,68	0,68	0,68	1,36
Ocupación (Latente)	S y F	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
Periodo de construcción 2020-Act							
	L, S y F	0,44	1,32	1,32	2,2	4,4	2,2
Iluminación CTE DB-HE 2019	L, S y F	0,44	1,32	1,32	2,2	4,4	2,2
Equipos CTE DB-HE 2019	L, S y F	0,44	1,32	1,32	2,2	4,4	2,2
Periodo de construcción 2020-Act							

L: día laboral, S: sábado, F: domingo y festivo

Porcentaje de uso de ACS asociado al perfil de uso de espacios en uso residencial privado:

Hora	%	Hora	%	Hora	%	Hora	%
0h	1	6h	3	12h	5	18h	5
1h	0	7h	10	13h	5	19h	7
2h	0	8h	7	14h	4	20h	6
3h	0	9h	7	15h	3	21h	6
4h	0	10h	6	16h	4	22h	5
5h	1	11h	6	17h	4	23h	5

El % se refiere al tanto por ciento respecto a la demanda diaria de ACS.

6. Valores de transmitancia para los Cerramientos según distintas versiones de la normativa.

_MuroExterior:

Superficie interior	
Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² ·K)	2,152
Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² ·K)	5,540
Resistencia superficial (m ² ·K/W)	0,130
Superficie exterior	
Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² ·K)	2,152
Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² ·K)	5,540
Resistencia superficial (m ² ·K/W)	0,130
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (W/m ² ·K)	1,745
Valor R (m ² ·K/W)	0,833
Valor U (W/m²·K)	1,200
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,1852
Km - Capacidad térmica interna (KJ/m ² ·K)	97,2780
Límite superior de resistencia (m ² ·K/W)	0,833
Límite inferior de resistencia (m ² ·K/W)	0,833
Valor U de superficie a superficie (W/m ² ·K)	1,745
Valor R (m ² ·K/W)	0,833
Valor U (W/m²·K)	1,200

Interfaz DesignBuilder muestra valores calculados _MuroExterior NBE-CT-1979(1).

Superficie interior	
Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² ·K)	2,152
Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² ·K)	5,540
Resistencia superficial (m ² ·K/W)	0,130
Superficie exterior	
Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² ·K)	2,152
Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² ·K)	5,540
Resistencia superficial (m ² ·K/W)	0,130
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (W/m ² ·K)	1,108
Valor R (m ² ·K/W)	1,163
Valor U (W/m²·K)	0,860
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,1974
Km - Capacidad térmica interna (KJ/m ² ·K)	83,7360
Límite superior de resistencia (m ² ·K/W)	1,163
Límite inferior de resistencia (m ² ·K/W)	1,163
Valor U de superficie a superficie (W/m ² ·K)	1,108
Valor R (m ² ·K/W)	1,163
Valor U (W/m²·K)	0,860

Interfaz DesignBuilder muestra valores calculados _MuroExterior CTE DB-HE 2006(3).

Superficie interior	
Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	2,152
Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,540
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,130
Superficie exterior	
Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	2,152
Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,540
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,130
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	0,459
Valor R (m ² -K/W)	2,438
Valor U (W/m²-K)	0,410
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,2446
Km - Capacidad térmica interna (kJ/m ² -K)	64,2000
Límite superior de resistencia (m ² -K/W)	2,438
Límite inferior de resistencia (m ² -K/W)	2,438
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	0,459
Valor R (m ² -K/W)	2,438
Valor U (W/m²-K)	0,410

Interfaz DesignBuilder muestra valores calculados _MuroExterior CTE DB-HE 2019(4).

_Cubierta:

Superficie interior	
Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	2,152
Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,540
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,130
Superficie exterior	
Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	2,152
Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,540
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,130
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	0,855
Valor R (m ² -K/W)	1,429
Valor U (W/m²-K)	0,700
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,2819
Km - Capacidad térmica interna (kJ/m ² -K)	215,0000
Límite superior de resistencia (m ² -K/W)	1,429
Límite inferior de resistencia (m ² -K/W)	1,429
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	0,855
Valor R (m ² -K/W)	1,429
Valor U (W/m²-K)	0,700

Interfaz DesignBuilder muestra valores calculados _Cubierta NBE-CT-1979(1).

Superficie interior		
Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	2,152	
Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,540	
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,130	
Superficie exterior		
Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	2,152	
Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,540	
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,130	
Sin Puentes Térmicos		
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	0,562	
Valor R (m ² -K/W)	2,040	
Valor U (W/m²-K)	0,490	
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)		
Espesor (m)	0,3045	
Km - Capacidad térmica interna (KJ/m ² -K)	215,0000	
Límite superior de resistencia (m ² -K/W)	2,040	
Límite inferior de resistencia (m ² -K/W)	2,040	
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	0,562	
Valor R (m ² -K/W)	2,040	
Valor U (W/m²-K)	0,490	

Interfaz DesignBuilder muestra valores calculados _Cubierta CTE DB-HE 2006(3).

Superficie interior		
Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	2,152	
Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,540	
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,130	
Superficie exterior		
Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	2,152	
Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,540	
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,130	
Sin Puentes Térmicos		
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	0,385	
Valor R (m ² -K/W)	2,856	
Valor U (W/m²-K)	0,350	
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)		
Espesor (m)	0,3347	
Km - Capacidad térmica interna (KJ/m ² -K)	215,000	
Límite superior de resistencia (m ² -K/W)	2,856	
Límite inferior de resistencia (m ² -K/W)	2,856	
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	0,385	
Valor R (m ² -K/W)	2,856	
Valor U (W/m²-K)	0,350	

Interfaz DesignBuilder muestra valores calculados _Cubierta CTE DB-HE 2019(4).

_TabiqueríaInterior:

Superficie interior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	2,152
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,540
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,130
Superficie exterior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	2,152
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,540
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,130
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	2,740
Valor R (m ² -K/W)	0,625
Valor U (W/m²-K)	1,600
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,1775
Km - Capacidad térmica interna (KJ/m ² -K)	105,8250
Límite superior de resistencia (m ² -K/W)	0,625
Límite inferior de resistencia (m ² -K/W)	0,625
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	2,740
Valor R (m ² -K/W)	0,625
Valor U (W/m²-K)	1,600

Interfaz DesignBuilder muestra valores calculados _TabiqueríaInterior NBE-CT-1979(1).

Superficie interior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	2,152
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,540
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,130
Superficie exterior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	2,152
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,540
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,130
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	1,350
Valor R (m ² -K/W)	1,001
Valor U (W/m²-K)	0,999
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,1914
Km - Capacidad térmica interna (KJ/m ² -K)	90,3960
Límite superior de resistencia (m ² -K/W)	1,001
Límite inferior de resistencia (m ² -K/W)	1,001
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	1,350
Valor R (m ² -K/W)	1,001
Valor U (W/m²-K)	0,999

Interfaz DesignBuilder muestra valores calculados _TabiqueríaInterior CTE DB-HE 2006(3).

Superficie interior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	2,152
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,540
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,130
Superficie exterior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	2,152
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,540
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,130
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	1,745
Valor R (m ² -K/W)	0,833
Valor U (W/m²-K)	1,200
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,1852
Km - Capacidad térmica interna (KJ/m ² -K)	97,2780
Límite superior de resistencia (m ² -K/W)	0,833
Límite inferior de resistencia (m ² -K/W)	0,833
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	1,745
Valor R (m ² -K/W)	0,833
Valor U (W/m²-K)	1,200

Interfaz DesignBuilder muestra valores calculados _TabiqueríaInterior CTE DB-HE 2019(4).

_Medianeras:

Superficie interior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	2,152
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,540
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,130
Superficie exterior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	2,152
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,540
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,130
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	1,745
Valor R (m ² -K/W)	0,833
Valor U (W/m²-K)	1,200
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,1852
Km - Capacidad térmica interna (KJ/m ² -K)	97,2780
Límite superior de resistencia (m ² -K/W)	0,833
Límite inferior de resistencia (m ² -K/W)	0,833
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	1,745
Valor R (m ² -K/W)	0,833
Valor U (W/m²-K)	1,200

Interfaz DesignBuilder muestra valores calculados _Medianeras NBE-CT-1979(1).

Superficie interior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m²-K)	2,152
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m²-K)	5,540
Resistencia superficial (m²-K/W)	0,130
Superficie exterior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m²-K)	2,152
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m²-K)	5,540
Resistencia superficial (m²-K/W)	0,130
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (W/m²-K)	1,108
Valor R (m²-K/W)	1,163
Valor U (W/m²-K)	0,860
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,1974
Km - Capacidad térmica interna (KJ/m²-K)	83,7360
Límite superior de resistencia (m²-K/W)	1,163
Límite inferior de resistencia (m²-K/W)	1,163
Valor U de superficie a superficie (W/m²-K)	1,108
Valor R (m²-K/W)	1,163
Valor U (W/m²-K)	0,860

Interfaz DesignBuilder muestra valores calculados _Medianeras CTE DB-HE 2006(3).

Superficie interior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m²-K)	2,152
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m²-K)	5,540
Resistencia superficial (m²-K/W)	0,130
Superficie exterior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m²-K)	2,152
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m²-K)	5,540
Resistencia superficial (m²-K/W)	0,130
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (W/m²-K)	0,782
Valor R (m²-K/W)	1,538
Valor U (W/m²-K)	0,650
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,2113
Km - Capacidad térmica interna (KJ/m²-K)	68,3070
Límite superior de resistencia (m²-K/W)	1,538
Límite inferior de resistencia (m²-K/W)	1,538
Valor U de superficie a superficie (W/m²-K)	0,782
Valor R (m²-K/W)	1,538
Valor U (W/m²-K)	0,650

Interfaz DesignBuilder muestra valores calculados _Medianeras CTE DB-HE 2019(4).

_SoleraEnContactoTerreno:

Superficie interior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	0,342
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,540
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,170
Superficie exterior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	19,870
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,130
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,040
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	0,821
Valor R (m ² -K/W)	1,428
Valor U (W/m²-K)	0,700
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,2807
Km - Capacidad térmica interna (KJ/m ² -K)	240,0000
Límite superior de resistencia (m ² -K/W)	1,428
Límite inferior de resistencia (m ² -K/W)	1,428
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	0,821
Valor R (m ² -K/W)	1,428
Valor U (W/m²-K)	0,700

Interfaz DesignBuilder muestra valores calculados _SoleraEnContactoTerreno

NBE-CT-1979(1).

Superficie interior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	0,342
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,540
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,170
Superficie exterior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² -K)	19,870
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² -K)	5,130
Resistencia superficial (m ² -K/W)	0,040
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	1,049
Valor R (m ² -K/W)	1,163
Valor U (W/m²-K)	0,860
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,2709
Km - Capacidad térmica interna (KJ/m ² -K)	240,000
Límite superior de resistencia (m ² -K/W)	1,163
Límite inferior de resistencia (m ² -K/W)	1,163
Valor U de superficie a superficie (W/m ² -K)	1,049
Valor R (m ² -K/W)	1,163
Valor U (W/m²-K)	0,860

Interfaz DesignBuilder muestra valores calculados _SoleraEnContactoTerreno

CTE DB-HE 2006(3).

Superficie interior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m²·K)	0,342
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m²·K)	5,540
Resistencia superficial (m²·K/W)	0,170
Superficie exterior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m²·K)	19,870
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m²·K)	5,130
Resistencia superficial (m²·K/W)	0,040
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (W/m²·K)	0,753
Valor R (m²·K/W)	1,339
Valor U (W/m²·K)	0,650
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,2848
Km - Capacidad térmica interna (KJ/m²·K)	240,000
Límite superior de resistencia (m²·K/W)	1,539
Límite inferior de resistencia (m²·K/W)	1,539
Valor U de superficie a superficie (W/m²·K)	0,753
Valor R (m²·K/W)	1,539
Valor U (W/m²·K)	0,650

Interfaz DesignBuilder muestra valores calculados _SoleraEnContactoTerreno

CTE DB-HE 2019(4).

_ForjadoInterior:

Superficie interior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m²·K)	2,152
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m²·K)	5,540
Resistencia superficial (m²·K/W)	0,130
Superficie exterior	
Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m²·K)	2,152
Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m²·K)	5,540
Resistencia superficial (m²·K/W)	0,130
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (W/m²·K)	1,742
Valor R (m²·K/W)	0,834
Valor U (W/m²·K)	1,199
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,3186
Km - Capacidad térmica interna (KJ/m²·K)	120,600
Límite superior de resistencia (m²·K/W)	0,834
Límite inferior de resistencia (m²·K/W)	0,834
Valor U de superficie a superficie (W/m²·K)	1,742
Valor R (m²·K/W)	0,834
Valor U (W/m²·K)	1,199

Interfaz DesignBuilder muestra valores calculados _ForjadoInterior

NBE-CT-1979(1).

Superficie interior	
Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² ·K)	2,152
Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² ·K)	5,540
Resistencia superficial (m ² ·K/W)	0,130
Superficie exterior	
Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² ·K)	2,152
Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² ·K)	5,540
Resistencia superficial (m ² ·K/W)	0,130
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (W/m ² ·K)	1,742
Valor R (m ² ·K/W)	0,834
Valor U (W/m²·K)	1,199
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,3186
Km - Capacidad térmica interna (kJ/m ² ·K)	120,6000
Límite superior de resistencia (m ² ·K/W)	0,834
Límite inferior de resistencia (m ² ·K/W)	0,834
Valor U de superficie a superficie (W/m ² ·K)	1,742
Valor R (m ² ·K/W)	0,834
Valor U (W/m²·K)	1,199

Interfaz DesignBuilder muestra valores calculados _ForjadoInterior

CTE DB-HE 2006(3).

Superficie interior	
Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² ·K)	2,152
Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² ·K)	5,540
Resistencia superficial (m ² ·K/W)	0,130
Superficie exterior	
Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² ·K)	2,152
Coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² ·K)	5,540
Resistencia superficial (m ² ·K/W)	0,130
Sin Puentes Térmicos	
Valor U de superficie a superficie (W/m ² ·K)	1,742
Valor R (m ² ·K/W)	0,834
Valor U (W/m²·K)	1,199
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)	
Espesor (m)	0,3186
Km - Capacidad térmica interna (kJ/m ² ·K)	120,6000
Límite superior de resistencia (m ² ·K/W)	0,834
Límite inferior de resistencia (m ² ·K/W)	0,834
Valor U de superficie a superficie (W/m ² ·K)	1,742
Valor R (m ² ·K/W)	0,834
Valor U (W/m²·K)	1,199

Interfaz DesignBuilder muestra valores calculados _ForjadoInterior

CTE DB-HE 2019(4).

7. Códigos EES modelos simplificados.

7.1. Refrigerante R134-a

Datos del ciclo

$$P_1 = 164 \text{ [kPa]}$$

$$P_2 = 1150 \text{ [kPa]}$$

$$P_3 = P_2$$

$$P_4 = P_1$$

$$s_1 = s_2$$

$$x_3 = 0$$

$$h_3 = h_4$$

$$x_1 = 1$$

Estado 1

$$h_1 = h(\text{R134a}; x=x_1; P=P_1)$$

$$s_1 = s(\text{R134a}; x=x_1; P=P_1)$$

$$T_1 = T(\text{R134a}; P=P_1; h=h_1)$$

$$v_1 = v(\text{R134a}; T=T_1; h=h_1)$$

Estado 2

$$h_2 = h(\text{R134a}; s=s_2; P=P_2)$$

$$T_2 = T(\text{R134a}; P=P_2; h=h_2)$$

Estado 3

$$h_3 = h(\text{R134a}; x=x_3; P=P_3)$$

$$T_3 = T(\text{R134a}; P=P_3; h=h_3)$$

$$s_3 = s(\text{R134a}; x=x_3; P=P_3)$$

Estado 4

$$T_4 = T(\text{R134a}; P=P_4; h=h_4)$$

$$s_4 = s(\text{R134a}; P=P_4; h=h_4)$$

Balance del evaporador

$$Q_L = \dot{m}_{\text{real}} \cdot (h_1 - h_4)$$

Balance en el condensador

$$Q_H = \dot{m}_{\text{real}} \cdot (h_2 - h_3)$$

COP

$$\text{COP}_{\text{refrig}} = \frac{Q_L}{W_{\text{real,compresor}}}$$

$$\text{COP}_{\text{bomba,calor}} = \frac{Q_H}{W_{\text{real,compresor}}}$$

Mejora del compresor

$$W_{real,compresor} = 1,4$$

$$W_{real,compresor} = \dot{m}_{real} \cdot \left[\frac{h_2 - h_1}{rend_{is}} \right]$$

$$rend_{is} = 0,874 - 0,0135 \cdot \frac{P_2}{P_1}$$

Sort	1 h _i	2 P _i [kPa]	3 s _i	4 T _i	5 v _i	6 x _i
[1]	241,5	164	0,9414	-15,01	0,1206	1
[2]	282,1	1150	0,9414	52,37		
[3]	115,3	1150	0,4167	44,65		0
[4]	115,3	164	0,4525	-15,01		

$$COP_{bomba,calor} = 3,198$$

$$Q_L = 3,386 \text{ [kJ/kg]}$$

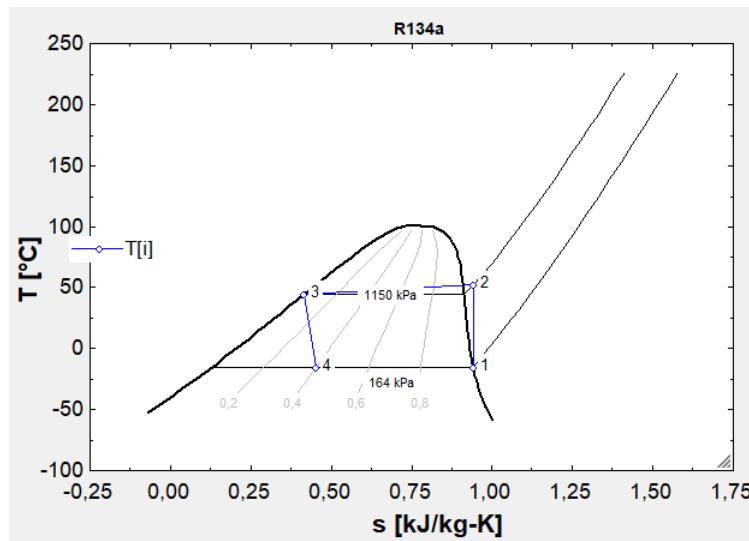
$$COP_{refrig} = 2,419 \text{ [kJ/kg]}$$

$$rend_{is} = 0,7793$$

$$\dot{m}_{real} = 0,02683$$

$$Q_H = 4,477$$

$$W_{real,compresor} = 1,4 \text{ [kJ/kg]}$$



7.2. Refrigerante R-22

Como el código es el mismo que con el refrigerante R134-a y lo único que cambia es que en las propiedades termodinámicas ahora el fluido refrigerante es R-22, no vamos a poner de manera íntegra otra vez todo el código del modelado ya que se puede ver en el anexo 7.1. Vamos a presentar en este y los siguientes anexos únicamente los resultados obtenidos.

<input type="button" value="Sort"/> 1	P _i [kPa]	2	h _i	3	s _i	4	x _i	5	T _i
[1]	296		399		1,774		1		-15,02
[2]	1700		443,6		1,774				72,58
[3]	1700		255,5		1,185		0		44,27
[4]	296		255,5		1,218				-15,02

$$\text{COP}_{\text{bomba,calor}} = 3,364$$

$$Q_L = 3,851 \text{ [kJ/kg]}$$

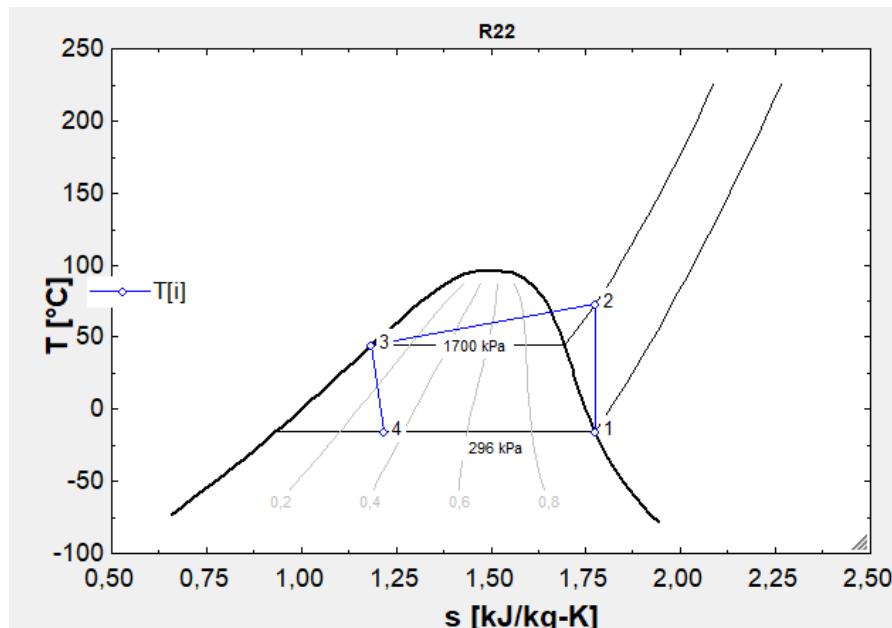
$$\text{COP}_{\text{refrig}} = 2,567 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\text{rend}_{\text{is}} = 0,7965$$

$$m_{\text{real}} = 0,02684$$

$$Q_H = 5,046$$

$$W_{\text{real,compresor}} = 1,5 \text{ [kJ/kg]}$$



7.3. Refrigerante R-32

<input type="button" value="Sort"/> 1	P _i [kPa]	2	h _i [kJ/kg]	3	s _i [kJ/kg-K]	4	x _i	5	T _i [C]
[1]	470		511,3		2,215		1		-16,04
[2]	2605		584		2,215				90,86
[3]	2605		280		1,265		0		42,06
[4]	470		280		1,315				-16,04

$$\text{COP}_{\text{bomba,calor}} = 3,341$$

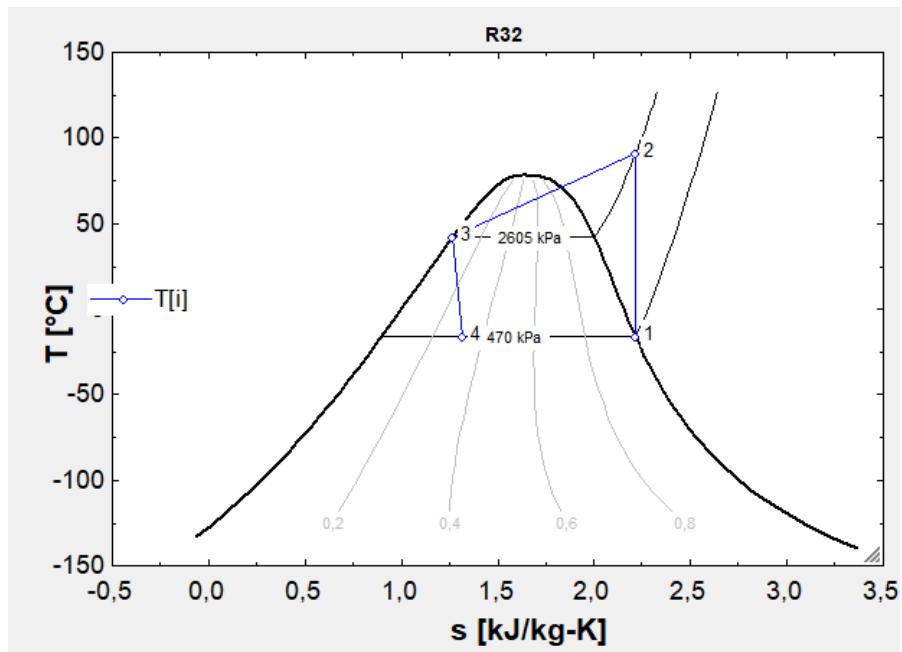
$$Q_L = 4,321 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\text{COP}_{\text{refrig}} = 2,542 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\text{rend}_{\text{is}} = 0,7992$$

$$m_{\text{real}} = 0,01868$$

$$Q_H = 5,679$$



7.4. Refrigerante R-290

Sort	1 P _i [kPa]	2 h _i [kJ/kg]	3 s _i [kJ/kg-K]	4 x _i	5 T _i [C]
[1]	305,9	559,3	2,389	1	-13,61
[2]	1500	634	2,389		51,02
[3]	1500	319,5	1,398	0	43,99
[4]	305,9	319,5	1,465		-13,61

$$\text{COP}_{\text{bomba, calor}} = 3,402$$

$$Q_L = 4,151 \text{ [kJ/kg]}$$

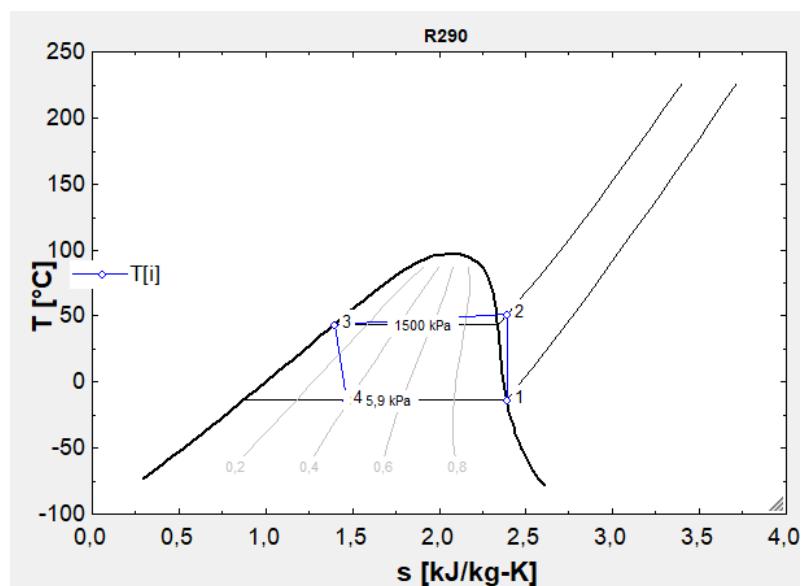
$$\text{COP}_{\text{refrig}} = 2,594 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\text{rend}_{\text{is}} = 0,8078$$

$$\dot{m}_{\text{real}} = 0,01731$$

$$\text{W}_{\text{real, compresor}} = 1,6 \text{ [kJ/kg]}$$

$$Q_H = 5,443$$



7.5. Refrigerante R-410-a

Sort	P_i [kPa]	h_i [kJ/kg]	s_i [kJ/kg-K]	x_i	T_i [C]
[1]	483,8	416,2	1,84	1	-14,78
[2]	2600	463,7	1,84		69,02
[3]	2600	271,7	1,237	0	42,89
[4]	483,8	271,7	1,281		-14,84

$$\text{COP}_{\text{bomba,calor}} = 3,241$$

$$Q_L = 3,172 \text{ [kJ/kg]}$$

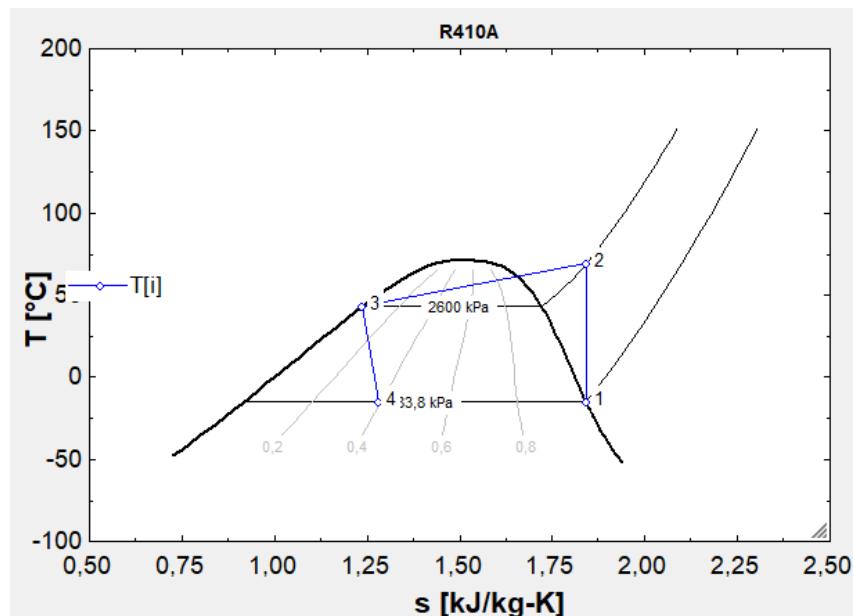
$$\text{COP}_{\text{refrig}} = 2,44 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\text{rend}_{\text{is}} = 0,8014$$

$$\dot{m}_{\text{real}} = 0,02194$$

$$Q_H = 4,214$$

$$W_{\text{real,compresor}} = 1,3 \text{ [kJ/kg]}$$



8. Códigos EES modelos completo.

8.1. Refrigerante R134-a

Datos del ciclo

$$P_1 = 164 \text{ [kPa]}$$

$$P_2 = 1150 \text{ [kPa]}$$

$$P_3 = P_2$$

$$P_4 = P_1$$

$$s_1 = s_2$$

$$h_3 = h_4$$

Estado 1

$$h_1 = h(\text{R134a}; T = T_1; P = P_1)$$

$$s_1 = s(\text{R134a}; T = T_1; P = P_1)$$

$$T_1 = -1$$

$$v_1 = v(\text{R134a}; T = T_1; h = h_1)$$

Estado 2

$$h_2 = h(\text{R134a}; s = s_2; P = P_2)$$

$$T_2 = T(\text{R134a}; P = P_2; h = h_2)$$

Estado 3

$$h_3 = h(\text{R134a}; T = T_3; P = P_3)$$

$$T_3 = 42$$

$$s_3 = s(\text{R134a}; T = T_3; P = P_3)$$

Estado 4

$$T_4 = T(\text{R134a}; P = P_4; h = h_4)$$

$$s_4 = s(\text{R134a}; P = P_4; h = h_4)$$

Balance del evaporador

$$Q_L = \dot{m}_{\text{real}} \cdot (h_1 - h_4)$$

Balance en el compresor

Balance en el condensador

$$Q_H = \dot{m}_{\text{real}} \cdot (h_2 - h_3)$$

COP

$$\text{COP}_{\text{bomba; calor}} = \frac{Q_H}{W_{\text{real, compresor}}}$$

W_{entra} es el W_{neto}

Mejora del compresor

$$W_{\text{real, compresor}} = 1,4$$

$$W_{\text{real, compresor}} = \dot{m}_{\text{real}} \cdot \left[\frac{h_2 - h_1}{\text{rend}_{\text{is}}} \right]$$

$$\text{rend}_{\text{is}} = 0,874 - 0,0135 \cdot \frac{P_2}{P_1}$$

Mejora evaporador

$$Q_{\text{eva}} = U_{\text{tp,eva}} \cdot \left[A_{\text{eva}} - C_{\text{eva}} \cdot \frac{\dot{m}_{\text{real}}}{U_{\text{sh,eva}}} \cdot \ln \left(\frac{T_a - T_1}{T_a - T_{\text{eva}}} \right) \right] \cdot (T_a - T_{\text{eva}}) + C_{\text{eva}} \cdot \dot{m}_{\text{real}} \cdot (T_1 - T_{\text{eva}})$$

$$U_{\text{tp,eva}} = \left[\frac{1}{\frac{\text{alfatp}_{\text{eva}}}{1000}} + \frac{d_{\text{eva}}}{2 \cdot \frac{\text{landa}_{\text{tube}}}{1000}} \cdot \ln \left(\frac{d_{\text{0,eva}}}{d_{\text{eva}}} \right) + \frac{1}{\frac{\text{alfao}_{\text{eva}}}{1000} \cdot \varepsilon \cdot \eta_{\text{fin}}} \cdot \frac{A_{\text{eva}} \cdot 0,8}{A_{\text{0,eva}}} \right]^{-1}$$

$$U_{\text{sh,eva}} = \left[\frac{1}{\frac{\text{alfash}_{\text{eva}}}{1000}} + \frac{d_{\text{eva}}}{2 \cdot \frac{\text{landa}_{\text{tube}}}{1000}} \cdot \ln \left(\frac{d_{\text{0,eva}}}{d_{\text{eva}}} \right) + \frac{1}{\frac{\text{alfao}_{\text{eva}}}{1000} \cdot \varepsilon \cdot \eta_{\text{fin}}} \cdot \frac{A_{\text{eva}} \cdot 0,2}{A_{\text{0,eva}}} \right]^{-1}$$

$$A_{\text{eva}} = 0,3445 \text{ [m}^2]$$

$$A_{\text{0,eva}} = 6 \text{ [m}^2]$$

$$d_{\text{eva}} = 0,00852$$

$$d_{\text{0,eva}} = 0,00952$$

$$\text{Número}_{\text{tubos}} = N_T \cdot N_L$$

$$N_T = 4$$

$$N_L = 18$$

$$T_a = 5$$

$$T_{\text{eva}} = T(\text{R134a}; P = P_1; x = 1)$$

$$\varepsilon = 1$$

$$\eta_{\text{fin}} = 0,95$$

$$\text{landa}_{\text{tube}} = 50$$

$$C_{\text{eva}} = C_p(\text{R134a}; T = T_1; P = P_1)$$

$$\text{alfao}_{\text{eva}} = \frac{v_{\text{eva;aire}} \cdot k_{\text{eva;aire}}}{d_{\text{0,eva}}}$$

$$T_{\text{p,eva}} = \frac{T_a + T_1}{2}$$

$$\text{densidad}_{\text{eva}} = \rho(\text{Air}; T = T_{\text{p,eva}}; P = P_1)$$

$$v_{\text{aire}} = \text{KinematicViscosity}(\text{Air}; T = T_{\text{p,eva}}; P = P_1)$$

$$Re_{\text{eva,aire}} = \frac{v_{\text{speed,aire}} \cdot d_{\text{0,eva}}}{v_{\text{aire}}}$$

$$v_{\text{speed,aire}} = 2$$

Tabla 1 $Re_{\text{eva,aire}}=2209$

$$C = 0,683$$

$$m = 0,466$$

$$Pr_{\text{eva,aire}} = Pr(\text{Air}; T = T_{\text{p,eva}})$$

$$k_{eva;aire} = k (\text{Air}; T = T_{p,eva})$$

$$\nu_{eva;aire} = C \cdot Re_{eva;aire}^m \cdot Pr_{eva;aire}$$

$$\alpha_{fatp,eva} = h_{en} + h_c$$

$$h_c = 0,023 \cdot \frac{k_{l,eva}}{\rho_{eva}} \cdot Re_{l,eva}^{0,8} \cdot Pr_{l,eva}^{0,4} \cdot F$$

$$h_{en} = 0,00122 \cdot \frac{k_{l,eva}^{0,79} \cdot cp_{l,eva}^{0,45} \cdot \rho_{eva}^{0,49}}{\sigma_{l,eva}^{0,5} \cdot \mu_{l,eva}^{0,29} \cdot \rho_{v,eva}^{0,24} \cdot h_{l,eva}^{0,24}} \cdot \delta_{T,eva}^{0,24} \cdot \delta_{P,eva}^{0,75} \cdot S$$

$$S = \frac{1}{1 + 0,00000253 \cdot Re_{BF,eva}^{1,17}}$$

$$Re_{BF,eva} = F^{1,25} \cdot Re_{l,eva}$$

$$Psat_{eva} = 200,7$$

$$\delta_{P,eva} = (Psat_{eva} - P_1) \cdot 1000 \text{ [Pa]}$$

$$\delta_{T,eva} = T_1 + 273 - (Tsat_{eva} + 273)$$

$$h_{l,eva} = h (R134a; T = Tsat_{eva}; P = P_1)$$

$$\sigma_{l,eva} = SurfaceTension (R134a; T = T_{p,eva})$$

$$k_{l,eva} = k (R134a; T = Tsat_{eva}; P = P_1)$$

$$cp_{l,eva} = Cp (R134a; T = Tsat_{eva}; P = P_1)$$

$$Re_{l,eva} = \frac{\frac{m_{real}}{A_{l,eva}} \cdot (1 - X) \cdot \rho_{eva}}{\mu_{l,eva}}$$

$$X = 0,9$$

$$\mu_{l,eva} = Visc (R134a; T = Tsat_{eva}; P = P_1)$$

$$Pr_{l,eva} = Pr (R134a; T = Tsat_{eva}; P = P_1)$$

$$Tsat_{eva} = -15,01$$

$$T_{p,eva,v} = \frac{Tsat_{eva} + Ta}{2}$$

F depende del Parametro de Martinelli

$$X_{tt} = \left[\frac{1 - X}{X} \right]^{0,9} \cdot \left[\frac{\rho_{v,eva}}{\rho_{l,eva}} \right]^{0,5} \cdot \left[\frac{\mu_{l,eva}}{\mu_{v,eva}} \right]^{0,1}$$

$$\rho_{v,eva} = \rho (R134a; T = T_{p,eva,v}; P = P_1)$$

$$\rho_{l,eva} = \rho (R134a; T = Tsat_{eva}; P = P_1)$$

$$\mu_{v,eva} = Visc (R134a; T = T_{p,eva,v}; P = P_1)$$

Xtt menor que 10

$$F = 2,35 \cdot \left[\frac{1}{X_{tt}} + 0,213 \right]^{0,736}$$

$$\alpha_{eva;sh} = \frac{v_{eva;sh} \cdot k_{eva;sh}}{d_{eva}}$$

$$k_{eva;sh} = k(R134a; T = T_1; P = P_1)$$

$$Re_{sh;eva} = \frac{4 \cdot \frac{\dot{m}_{real}}{\text{Número tubos}}}{d_{eva} \cdot 3,14 \cdot \mu_{eva;sh}}$$

$$Pr_{sh;eva} = Pr(R134a; T = T_1; P = P_1)$$

$$\mu_{eva;sh} = Visc(R134a; T = T_1; P = P_1)$$

$$v_{eva;sh} = 0,023 \cdot Re_{sh;eva}^{0,8} \cdot Pr_{sh;eva}^{0,4}$$

Mejora condensador

$$Q_{cond} = C_{cond} \cdot \dot{m}_{real} \cdot (T_2 - T_{cond}) + \dot{m}_{real} \cdot r_{cond} + U_{sc,cond} \cdot \left[A_{cond} - C_{cond} \cdot \frac{\dot{m}_{real}}{U_{sh,cond}} \cdot \ln \left(\frac{T_{cond} - Tw}{T_2 - Tw} \right) - \dot{m}_{real} \cdot \frac{r_{cond}}{U_{tp,cond} \cdot (T_{cond} - Tw)} \cdot \left[\frac{T_{cond} - T_3}{\ln \left(\frac{T_{cond} - Tw}{T_3 - Tw} \right)} \right] \right]$$

$$U_{tp,cond} = \left[\frac{1}{\alpha_{tp,cond}} + \frac{d_{i,cond}}{2 \cdot \frac{k_{cond}}{1000}} \cdot \ln \left(\frac{d_{o,cond}}{d_{i,cond}} \right) + \frac{1}{1000} \cdot \frac{A_{i,cond} \cdot 0,6}{A_{o,cond}} \right]^{-1}$$

$$U_{sh,cond} = \left[\frac{1}{\alpha_{sh,cond}} + \frac{d_{i,cond}}{2 \cdot \frac{k_{cond}}{1000}} \cdot \ln \left(\frac{d_{o,cond}}{d_{i,cond}} \right) + \frac{1}{1000} \cdot \frac{A_{i,cond} \cdot 0,3}{A_{o,cond}} \right]^{-1}$$

$$U_{sc,cond} = \left[\frac{1}{\alpha_{sc,cond}} + \frac{d_{i,cond}}{2 \cdot \frac{k_{cond}}{1000}} \cdot \ln \left(\frac{d_{o,cond}}{d_{i,cond}} \right) + \frac{1}{1000} \cdot \frac{A_{i,cond} \cdot 0,1}{A_{o,cond}} \right]^{-1}$$

$$k_{cond} = 50$$

$$C_{cond} = Cp(R134a; h = h_2; P = P_2)$$

$$r_{cond} = Enthalpy_{vaporization}(R134a; P = P_2)$$

$$T_{cond} = T(R134a; P = P_2; x = 0)$$

$$Tw = 40$$

$$d_{o,cond} = 0,0099$$

$$d_{i,cond} = 0,0084$$

$$A_{o,cond} = 1,87$$

$$A_{i,cond} = 0,3445$$

$$Re_{tp,cond} = \frac{densidad_{v,cond} \cdot u_{mv} \cdot d_{i,cond}}{\mu_{v,cond}}$$

$$Ts_{at,cond} = 29,84$$

$$Tp_{cond;v} = \frac{Tw + Ts_{at,cond}}{2}$$

$$densidad_{l,cond} = \rho(R134a; T = Tp_{cond;v}; P = P_2)$$

$$densidad_{v,cond} = \rho(R134a; T = Ts_{at,cond}; P = P_2)$$

$$u_{mv} = 1$$

$$\mu_{v,cond} = Visc(R134a; T = Tp_{cond;v}; P = P_2)$$

$$\mu_{l,cond} = Visc(R134a; T = Ts_{at,cond}; P = P_2)$$

$$k_{cond;l} = k(R134a; T = Ts_{at,cond}; P = P_2)$$

$$Pr_{l,cond} = Pr(R134a; T = Ts_{at,cond}; P = P_2)$$

Re>35000

$$\text{alfatp}_{\text{cond}} = \frac{k_{\text{cond};l}}{d_{\text{tubo}}} \cdot 0,0181 \cdot \text{Pr}_{l;\text{cond}}^{0,65} \cdot \left[\frac{\mu_{v;\text{cond}}}{\mu_{l;\text{cond}}} \right]^{0,078} \cdot \left[\frac{\text{densidad}_{l;\text{cond}}}{\text{densidad}_{v;\text{cond}}} \right]^{0,39} \cdot \left[\frac{\text{Re}_{L;\text{cond}}^{0,2} \cdot \text{Re}_{T;\text{cond}}^{0,7}}{1,25 + 0,39 \cdot \frac{\text{Re}_{L;\text{cond}}}{\text{Re}_{T;\text{cond}}}} \right]$$

$$\text{Re}_{L;\text{cond}} = \frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{real}}}{3,14 \cdot d_{\text{tubo}} \cdot \mu_{l;\text{cond}}}$$

$$\text{Re}_{T;\text{cond}} = \frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{real}}}{3,14 \cdot d_{\text{tubo}} \cdot \mu_{l;\text{cond}}}$$

$$\text{alfash}_{\text{cond}} = \frac{v_{\text{cond};sh} \cdot k_{\text{cond};sh}}{d_{\text{tubo}}}$$

$$k_{\text{cond};sh} = k(R134a; T = T_2; P = P_2)$$

$$\text{Re}_{sh;\text{cond}} = \frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{real}}}{d_{\text{tubo}} \cdot 3,14 \cdot \mu_{\text{cond};sh}}$$

$$\text{Pr}_{sh;\text{cond}} = \text{Pr}(R134a; T = T_2; P = P_2)$$

$$\mu_{\text{cond};sh} = \text{Visc}(R134a; T = T_2; P = P_2)$$

$$v_{\text{cond};sh} = 0,023 \cdot \text{Re}_{sh;\text{cond}}^{0,8} \cdot \text{Pr}_{sh;\text{cond}}^{0,3}$$

Convección natural

$$R_{\text{tanque}} = 0,25$$

$$L_{\text{tanque}} = 0,764$$

$$\text{Volumen}_{\text{tanque}} = 0,15$$

$$\beta_{\text{tanque}} = \beta(\text{water}; T = T_{\text{m,cond}}; P = 100)$$

$$\alpha_{\text{agua}} = \text{ThermalDiffusivity}(\text{water}; T = T_{\text{m,cond}}; P = 100)$$

$$Gr = 9,8 \cdot \beta_{\text{tanque}} \cdot (T_2 - T_w) \cdot \frac{L_{\text{tanque}}^3}{\alpha_{\text{agua}}}$$

$$\text{Pr}_{\text{cond};w} = \text{Pr}(\text{water}; T = T_{\text{m,cond}}; P = 100)$$

$$Ra_{\text{cond}} = Gr \cdot \text{Pr}_{\text{cond};w}$$

$$v_{\text{cond};w} = 0,59 \cdot Ra_{\text{cond}}^{(1/4)}$$

$$k_{\text{cond};w} = k(\text{water}; T = T_{\text{m,cond}}; P = 100)$$

$$\text{alfa}_w = \frac{v_{\text{cond};w} \cdot k_{\text{cond};w}}{d_{\text{tubo}}}$$

$$T_{\text{m,cond}} = \frac{T_w + T_2}{2}$$

Condensación

$$\text{alfasc}_{\text{cond}} = \frac{v_{\text{cond};sc} \cdot k_{\text{cond};sc}}{d_{\text{tubo}}}$$

$$k_{\text{cond};sc} = k(R134a; T = T_3; P = P_3)$$

$$\text{Re}_{sc;\text{cond}} = \frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{real}}}{d_{\text{tubo}} \cdot 3,14 \cdot \mu_{\text{cond};sc}}$$

$$\text{Pr}_{sc;\text{cond}} = \text{Pr}(R134a; T = T_3; P = P_3)$$

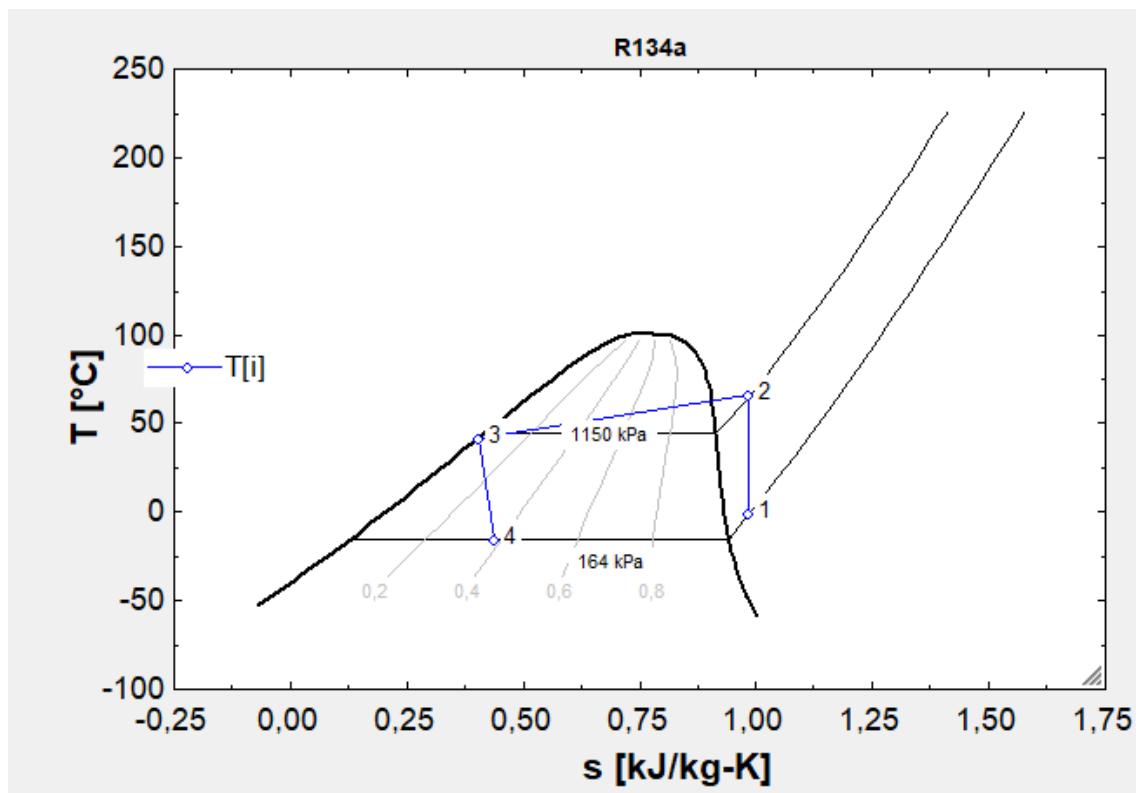
$$\mu_{\text{cond};sc} = \text{Visc}(R134a; T = T_3; P = P_3)$$

$$v_{\text{cond};sc} = 3,66$$

$$\text{COP}_{\text{real;bomba;calor}} = \frac{Q_{\text{cond}}}{W_{\text{real;compresor}}}$$

Sort	T_i [C]	P_i [kPa]	h_i [kJ/kg]	s_i [kJ/kg-K]	v_i [m ³ /kg]
[1]	-1	164	253,2	0,9855	0,1287
[2]	65,66	1150	296,8	0,9855	
[3]	42	1150	111,2	0,404	
[4]	-15,01	164	111,2	0,437	

$A_{cond} = 0,3445$ [kJ/kg-K]	$A_{eva} = 0,3445$ [m ²]	$\alpha_{o,eva} = 45,91$	$\alpha_{fasc,cond} = 32,58$
$\alpha_{fash,cond} = 34,17$	$\alpha_{fash,eva} = 25,28$	$\alpha_{fatp,cond} = 964,2$	$\alpha_{fatp,eva} = 993,7$
$\alpha_{fw} = 1249$	$\alpha_{agua} = 1,536E-07$	$\alpha_{o,cond} = 1,87$	$\alpha_{o,eva} = 6$ [m ²]
$\beta_{tanque} = 0,0004761$	$b_{cald} = 0,03942$	$C = 0,683$	$c_{apellets,cald} = 2,062$
$C_{cond} = 1,081$ [kJ/kg-K]	$C_{eva} = 0,836$ [kJ/kg-K]	$co2_{cald} = 1,734$	$COP_{bomba,calor} = 3,315$
$COP_{real,bomba,calor} = 3,281$ [kg/kJ]	$cp_{gs,cald} = 1,1$	$cpv_{cald} = 2$	$cpz_{cald} = 0,8$
$cp_{l,eva} = 1,304$	$c_{cald} = 0,473$	$\delta p_{eva} = 36700$ [Pa]	$\delta T_{eva} = 14,01$
$densidad_{eva} = 2,077$	$densidad_{l,cond} = 1170$	$densidad_{l,eva} = 1343$	$densidad_{v,cond} = 1191$
$densidad_{v,eva} = 7,908$	$d_{cond} = 0,0084$	$d_{eva} = 0,00852$	$d_{o,cond} = 0,0099$
$d_{o,eva} = 0,00952$	$d_{cald} = 0,1657$	$d_{r,cald} = 0,2178$	$e_{a,cald} = 0,315$
$\epsilon = 1$	$\eta_{calPCI,cald} = 0,9394$	$\eta_{calPCS,cald} = 0,8659$	$\eta_{fin} = 0,95$
$e_{cald} = 0,01387$	$F = 51,98$	$\gamma_{cald} = 1,315$	$Gr = 347659$ [C]
$g_{cald} = 8,297$	$g_{cald} = 0,0003094$	$h_{2ov,cald} = 0,646$	$hc = 6,679$
$hen = 987,1$	$h_{cald} = 0,064$	$h_{l,eva} = 31,98$	$j_{cald} = 0,03589$
$k_{cald} = 0,05792$	$k_{cond} = 50$	$k_{cond,l} = 0,0813$	$k_{cond,sc} = 0,07478$ [W/m-K]
$k_{cond,sh} = 0,01788$ [W/m-K]	$k_{cond,w} = 0,6337$	$k_{est,cald} = 0,04404$	$k_{eva,aire} = 0,02379$
$k_{eva,sh} = 0,01186$ [W/m-K]	$k_{l,eva} = 0,1008$	$L_{anda,tube} = 50$	$L_{ce,cald} = 0,0000372$
$L_{gs,cald} = 0,05305$	$L_{h2ov,cald} = 0,007509$	$L_{tanque} = 0,764$	$m = 0,466$
$\mu_{cond,sc} = 0,0001574$ [kg/m-s]	$\mu_{cond,sh} = 0,00001367$ [kg/m-s]	$\mu_{eva,sh} = 0,00001086$ [kg/m-s]	$\mu_{cond} = 0,0001845$
$\mu_{l,eva} = 0,0003233$	$\mu_{v,cond} = 0,0001728$	$\mu_{v,eva} = 0,0000107$	$m_{c,cald} = 0,0005729$
$m_{real} = 0,02501$	$n2_{cald} = 6,099$	$NL = 18$	$NT = 4$
$Numero_tubos = 72$	$v_{aire} = 0,000008375$	$v_{cond,sc} = 3,66$	$v_{cond,sh} = 16,06$
$v_{cond,w} = 19,52$	$v_{eva,aire} = 18,37$	$v_{eva,sh} = 18,16$	$n_{cald} = 0,0013$
$o2a_{cald} = 1,853$	$o2g_{cald} = 0,444$	$o_{cald} = 0,3738$	$PCl_{cald} = 18582$
$PCS_{cald} = 20160$	$Pr_{cond,w} = 3,445$	$Pr_{eva,aire} = 0,7338$	$Pr_{l,cond} = 3,268$
$Pr_{l,eva} = 4,181$	$Pr_{sc,cond} = 3,176$	$Pr_{sh,cond} = 0,8269$	$Pr_{sh,eva} = 0,7651$
$Psat_{eva} = 200,7$ [kPa]	$Q_{cond} = 4,594$ [kJ-C/kg-K]	$Q_{eva} = 13,32$	$Q_H = 4,641$
$Q_L = 3,55$	$Q_{u,cald} = 10$	$R_{a,cond} = 1,198E+06$ [C]	$r_{cond} = 158$ [kJ/kg]
$rend_{ls} = 0,7793$	$Re_{BF,eva} = 26,71$	$Re_{eva,aire} = 2274$	$Re_{L,cond} = 285,6$
$Re_{l,eva} = 0,1914$ [1/m ²]	$Re_{sc,cond} = 334,7$	$Re_{sh,cond} = 3854$	$Re_{sh,eva} = 4783$
$Re_{tp,cond} = 57871$	$Re_{T,cond} = 20565$	$R_{tanque} = 0,25$	$S = 0,9999$
$\sigma_{l,eva} = 0,01114$	$so2_{cald} = 0,0198$	$s_{cald} = 0,0099$	$Ta = 5$ [C]
$Ta_{cald} = 25$	$T_{cond} = 44,65$ [C]	$T_{eva} = -15,01$ [C]	$Tg_{cald} = 133$
$Tm_{cond} = 52,83$ [C]	$T_{pcond,v} = 34,92$	$T_{peva} = 2$	$T_{peva,v} = -5,005$
$Tsat_{cond} = 29,84$	$Tsat_{eva} = -15,01$	$T_w = 40$ [C]	$Usc_{cond} = 0,03255$
$Ush_{cond} = 0,03411$	$Ush_{eva} = 0,02511$	$Utp_{cond} = 0,8776$	$Utp_{eva} = 0,4834$
$u_{mv} = 1$	$velocidad_{aire} = 2$	$Volumen_{tanque} = 0,15$	$Wreal_{compresor} = 1,4$ [kJ/kg]
$w_{cald} = 0,07$	$X = 0,9$	$Xt = 0,01493$	$z_{cald} = 0,008$

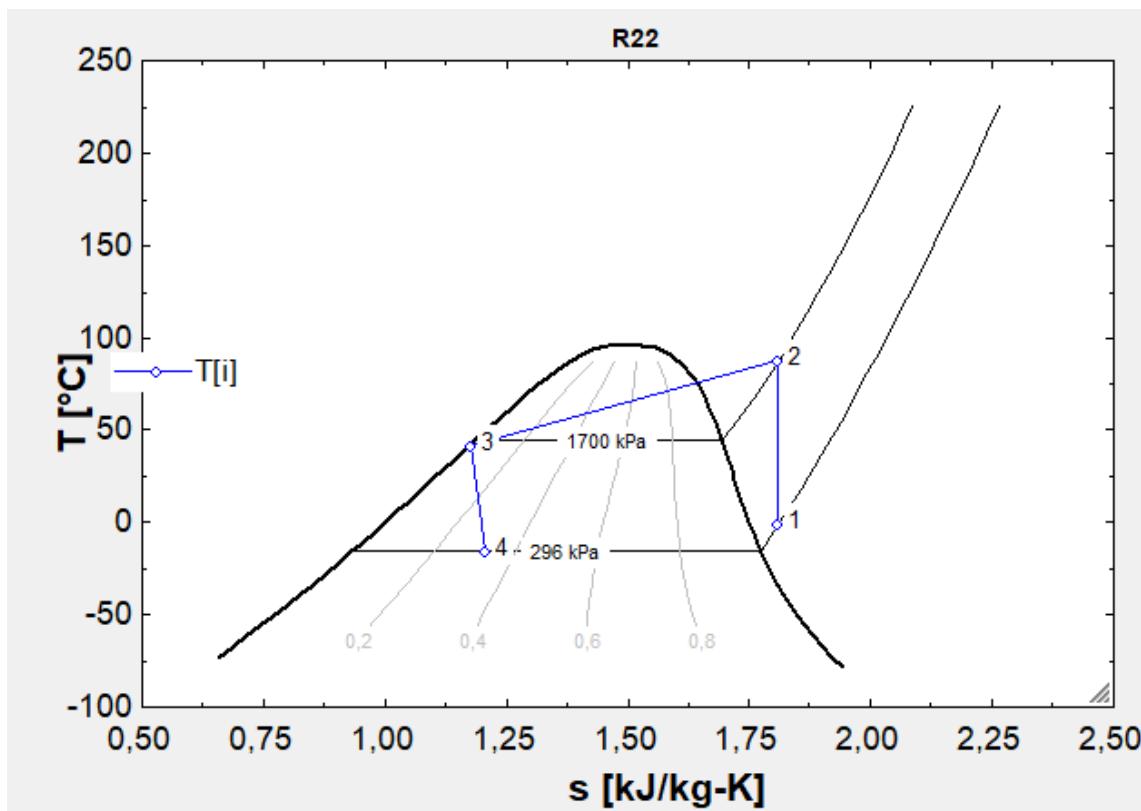


8.2. Refrigerante R-22

Como el código es el mismo que con el refrigerante R134-a y lo único que cambia es que en las propiedades termodinámicas ahora el fluido refrigerante es R-22, no vamos a poner de manera íntegra otra vez todo el código del modelado ya que se puede ver en el anexo 8.1. Vamos a presentar en este y los siguientes anexos únicamente los resultados obtenidos.

Sort	1 P _i [kPa]	2 h _i [kJ/kg]	3 s _i [kJ/kg-K]	4 T _i [C]	5 v _i [m ³ /kg]
[1]	296	408,7	1,81	-1	0,08298
[2]	1700	456,4	1,81	87,31	
[3]	1700	252,4	1,175	42	
[4]	296	252,4	1,206	-15,02	

$A_{\text{cond}} = 0,3445 \text{ [kJ/kg-K]}$	$A_{\text{eva}} = 0,3445 \text{ [m}^2]$	$\alpha_{\text{eva}} = 60,45$
$\alpha_{\text{asc,cond}} = 33,5$	$\alpha_{\text{ash,cond}} = 27,14$	$\alpha_{\text{ash,eva}} = 19,79$
$\alpha_{\text{atp,cond}} = 935,3$	$\alpha_{\text{atp,eva}} = 1613$	$\alpha_w = 1455$
$\alpha_{\text{agua}} = 1,569E-07$	$\alpha_{\text{cond}} = 1,87$	$\alpha_{\text{eva}} = 6 \text{ [m}^2]$
$\beta_{\text{tanque}} = 0,0005447$	$b_{\text{cald}} = 0,03942$	$C = 0,683$
$c_{\text{aleña,cald}} = 6250$	$C_{\text{cond}} = 0,8595 \text{ [kJ/kg-K]}$	$C_{\text{eva}} = 0,6819 \text{ [kJ/kg-K]}$
$co_2_{\text{cald}} = 1,734$	$COP_{\text{bomba,calor}} = 3,404$	$COP_{\text{real,bomba,calor}} = 3,389 \text{ [kg/kJ]}$
$cpgs_{\text{cald}} = 1,1$	$cpv_{\text{cald}} = 2$	$cpz_{\text{cald}} = 0,8$
$cp_{\text{l,eva}} = 0,6834$	$c_{\text{cald}} = 0,473$	$\delta p_{\text{eva}} = 2,970E+07 \text{ [Pa]}$
$\delta T_{\text{,eva}} = 4$	$\text{densidad}_{\text{eva}} = 3,748$	$\text{densidad}_{\text{i,cond}} = 1154$
$\text{densidad}_{\text{i,eva}} = 12,28$	$\text{densidad}_{\text{v,cond}} = 1175$	$\text{densidad}_{\text{v,eva}} = 12$
$d_{\text{cond}} = 0,0084$	$d_{\text{eva}} = 0,00852$	$d_{\text{cond}} = 0,0099$
$d_{\text{o,eva}} = 0,00952$	$d_{\text{cald}} = 0,1657$	$d_{\text{r,cald}} = 0,2178$
$e_{\text{a,cald}} = 0,315$	$\varepsilon = 1$	$\eta_{\text{calPCl,cald}} = 0,9299$
$\eta_{\text{calPCS,cald}} = 0,8583$	$\eta_{\text{fin}} = 0,95$	$e_{\text{cald}} = 0,01387$
$F = 10,39$	$\gamma_{\text{cald}} = 1,315$	$Gr = 717622 \text{ [C]}$
$g_{\text{g,cald}} = 8,297$	$g_{\text{cald}} = 0,0003094$	$h_{\text{2ov,cald}} = 0,646$
$hc = 0,9336$	$h_{\text{en}} = 1612$	$h_{\text{cald}} = 0,064$
$h_{\text{l,eva}} = 405,9$	$j_{\text{cald}} = 0,03589$	$k_{\text{cald}} = 0,05792$
$k_{\text{cond}} = 50$	$k_{\text{cond,l}} = 0,08326$	$k_{\text{cond,sc}} = 0,07688 \text{ [W/m-K]}$
$k_{\text{cond,sh}} = 0,01597 \text{ [W/m-K]}$	$k_{\text{cond,w}} = 0,6443$	$k_{\text{est,cald}} = 0,04404$
$k_{\text{eva,aire}} = 0,02379$	$k_{\text{eva,sh}} = 0,009605 \text{ [W/m-K]}$	$k_{\text{l,eva}} = 0,00937$
$l_{\text{anda,tube}} = 50$	$L_{\text{ce,cald}} = 0,00004305$	$L_{\text{gs,cald}} = 0,06139$
$L_{\text{h2ov,cald}} = 0,008691$	$L_{\text{tanque}} = 0,764$	$m = 0,466$
$\mu_{\text{cond,sc}} = 0,0001375 \text{ [kg/m-s]}$	$\mu_{\text{cond,sh}} = 0,00001616 \text{ [kg/m-s]}$	$\mu_{\text{eva,sh}} = 0,00001193 \text{ [kg/m-s]}$
$\mu_{\text{c,cond}} = 0,0001575$	$\mu_{\text{c,eva}} = 0,00001176$	$\mu_{\text{v,cond}} = 0,000149$
$\mu_{\text{v,eva}} = 0,00001197$	$m_{\text{c,cald}} = 0,0008681$	$m_{\text{real}} = 0,02504$
$n2_{\text{cald}} = 6,099$	$NL = 18$	$NT = 4$
$\text{Numero}_{\text{tubos}} = 72$	$v_{\text{aire}} = 0,00000464$	$v_{\text{cond,sc}} = 3,66$
$v_{\text{cond,sh}} = 14,27$	$v_{\text{cond,w}} = 22,35$	$v_{\text{eva,aire}} = 24,2$
$v_{\text{eva,sh}} = 17,55$	$n_{\text{cald}} = 0,0013$	$o2a_{\text{cald}} = 1,853$
$o2g_{\text{cald}} = 0,444$	$o_{\text{cald}} = 0,3738$	$PCI_{\text{cald}} = 18582$
$PCS_{\text{cald}} = 20133$	$P_{\text{r,cond,w}} = 2,87$	$P_{\text{r,eva,aire}} = 0,7338$
$P_{\text{r,l,cond}} = 2,41$	$P_{\text{r,l,eva}} = 0,8577$	$P_{\text{r,sc,cond}} = 2,417$
$P_{\text{r,sh,cond}} = 0,8696$	$P_{\text{r,sh,eva}} = 0,8468$	$Psat_{\text{eva}} = 30000 \text{ [kPa]}$
$Q_{\text{cond}} = 5,083 \text{ [kJ-C/kg-K]}$	$Q_{\text{eva}} = 19,69$	$Q_H = 5,106$
$Q_L = 3,911$	$Q_u_{\text{cald}} = 15$	$Ra_{\text{cond}} = 2,059E+06 \text{ [C]}$
$r_{\text{cond}} = 161,4 \text{ [kJ/kg]}$	$rend_{\text{is}} = 0,7965$	$Re_{\text{BF,eva}} = 98,22$
$Re_{\text{eva,aire}} = 4103$	$Re_{\text{L,cond}} = 335$	$Re_{\text{l,eva}} = 5,266 \text{ [1/m}^2]$
$Re_{\text{sc,cond}} = 383,7$	$Re_{\text{sh,cond}} = 3264$	$Re_{\text{sh,eva}} = 4359$
$Re_{\text{tp,cond}} = 66256$	$Re_{\text{T,cond}} = 24117$	$R_{\text{tanque}} = 0,25$
$S = 0,9995$	$\sigma_{\text{l,eva}} = 0,01145$	$so2_{\text{cald}} = 0,0198$
$s_{\text{cald}} = 0,0099$	$T_a = 5 \text{ [C]}$	$T_{\text{a,cald}} = 25$
$T_{\text{cond}} = 44,27 \text{ [C]}$	$T_{\text{eva}} = -15,02 \text{ [C]}$	$T_{\text{g,cald}} = 150$
$T_{\text{m,cond}} = 63,66 \text{ [C]}$	$T_{\text{p,cond,v}} = 34,92$	$T_{\text{p,eva}} = 2$
$T_{\text{p,eva,v}} = 0$	$T_{\text{sat,cond}} = 29,84$	$T_{\text{sat,eva}} = -5$
$Tw = 40 \text{ [C]}$	$U_{\text{sc,cond}} = 0,03347$	$U_{\text{sh,cond}} = 0,0271$
$U_{\text{sh,eva}} = 0,01971$	$U_{\text{tp,cond}} = 0,8628$	$U_{\text{tp,eva}} = 0,6997$
$u_{\text{mv}} = 1$	$velocidad_{\text{aire}} = 2$	$Volumen_{\text{tanque}} = 0,15$
$W_{\text{real,compresor}} = 1,5 \text{ [kJ/kg]}$	$w_{\text{cald}} = 0,07$	$X = 0,9$
$X_{\text{tt}} = 0,1366$	$z_{\text{cald}} = 0,008$	



8.3. Refrigerante R-32

Sort	1 P _i [kPa]	2 h _i [kJ/kg]	3 s _i [kJ/kg-K]	4 T _i [C]	5 v _i [m ³ /kg]
[1]	470	526,9	2,274	-1	0,08458
[2]	2605	606	2,274	109	
[3]	2605	279,8	1,265	42	
[4]	470	279,8	1,315	-16,04	

$$A_{i,\text{cond}} = 0,3445 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$\alpha_{fasc,\text{cond}} = 46,68$$

$$\alpha_{fatp,\text{cond}} = 1087$$

$$\alpha_{\text{agua}} = 1,598E-07$$

$$\beta_{\text{tanque}} = 0,0006088$$

$$ca_{\text{leña},\text{cald}} = 6250$$

$$co_{2,\text{cald}} = 1,734$$

$$cp_{gs,\text{cald}} = 1,1$$

$$cp_{l,\text{eva}} = 1,093$$

$$\delta_{T,\text{eva}} = 14,01$$

$$\text{densidad}_{l,\text{eva}} = 12,78$$

$$di_{\text{cond}} = 0,0084$$

$$Ai_{\text{eva}} = 0,3445 \text{ [m}^2]$$

$$\alpha_{fash,\text{cond}} = 29,89$$

$$\alpha_{fatp,\text{eva}} = 1356$$

$$Ao_{\text{cond}} = 1,87$$

$$b_{\text{cald}} = 0,03942$$

$$Cc_{\text{cond}} = 1,196 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$COP_{\text{bomba},\text{calor}} = 3,294$$

$$cp_{v,\text{cald}} = 2$$

$$c_{\text{cald}} = 0,473$$

$$\text{densidad}_{\text{eva}} = 5,951$$

$$\text{densidad}_{v,\text{cond}} = 945,3$$

$$di_{\text{eva}} = 0,00852$$

$$\alpha_{fash,\text{eva}} = 74,99$$

$$\alpha_{fash,\text{eva}} = 21,09$$

$$\alpha_{faw} = 1592$$

$$Ao_{\text{eva}} = 6 \text{ [m}^2]$$

$$C = 0,683$$

$$Ceva = 0,9935 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$COP_{\text{real,bomba},\text{calor}} = 3,195 \text{ [kg/kJ]}$$

$$cp_{z,\text{cald}} = 0,8$$

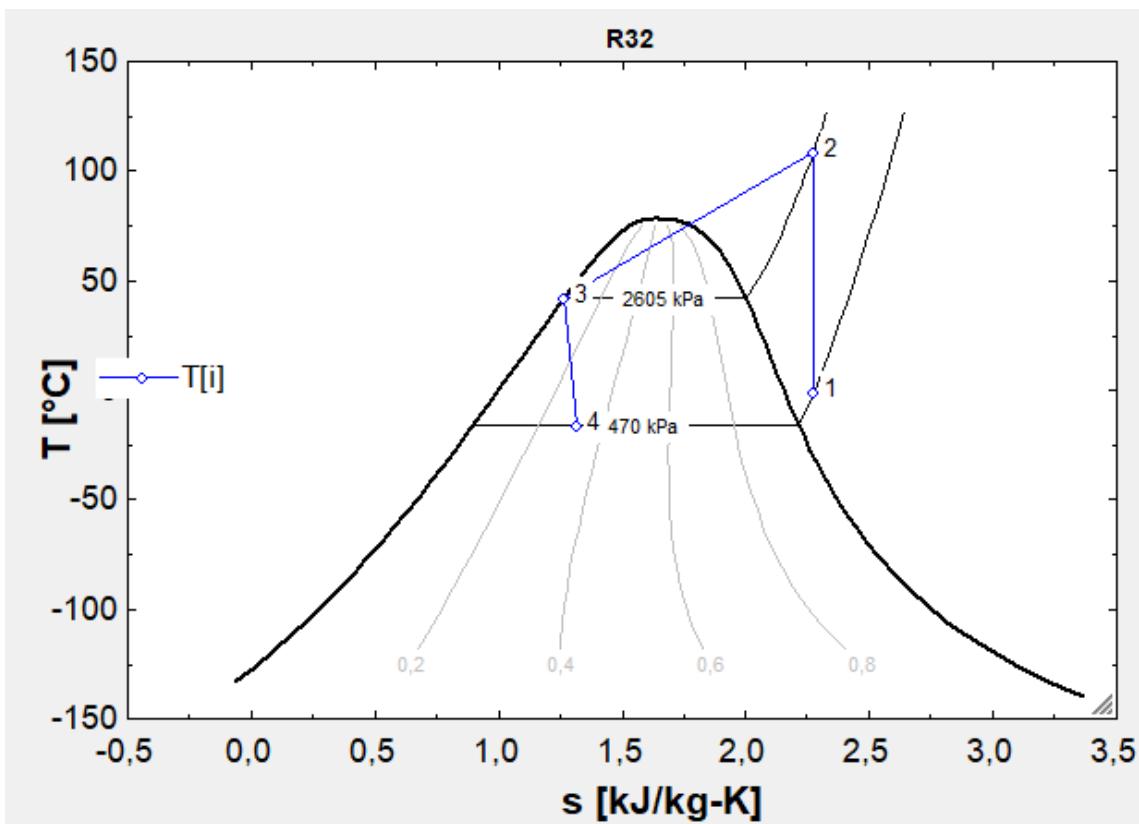
$$\delta p_{\text{eva}} = 8,530E+06 \text{ [Pa]}$$

$$\text{densidad}_{l,\text{cond}} = 921$$

$$\text{densidad}_{v,\text{eva}} = 12,07$$

$$do_{\text{cond}} = 0,0099$$

$d_{eva} = 0,00952$	$d_{cald} = 0,1657$	$d_{r,cald} = 0,2178$
$e_{cald} = 0,315$	$\varepsilon = 1$	$\eta_{calPCI,cald} = 0,9299$
$\eta_{calPCS,cald} = 0,8583$	$\eta_{fin} = 0,95$	$e_{cald} = 0,01387$
$F = 10,53$	$\gamma_{cald} = 1,315$	$Gr = 1,148E+06 [C]$
$g_{s,cald} = 8,297$	$g_{cald} = 0,0003094$	$h_{2ov,cald} = 0,646$
$h_c = 1,037$	$hen = 1355$	$h_{cald} = 0,064$
$h_{l,eva} = 512,4$	$j_{cald} = 0,03589$	$k_{cald} = 0,05792$
$k_{cond} = 50$	$k_{cond,l} = 0,12$	$k_{cond,sc} = 0,1071 [W/m-K]$
$k_{cond,sh} = 0,02187$	$k_{cond,w} = 0,6527$	$k_{est,cald} = 0,04404$
$k_{eva,aire} = 0,02379$	$k_{eva,sh} = 0,01326 [W/m-K]$	$k_{l,eva} = 0,01246$
$l_{anda,tube} = 50$	$L_{ce,cald} = 0,00004305$	$L_{gs,cald} = 0,06139$
$L_{h2ov,cald} = 0,008691$	$L_{tanque} = 0,764$	$m = 0,466$
$\mu_{cond,sc} = 0,00009513 [kg/m-s]$	$\mu_{cond,sh} = 0,0000147$	$\mu_{eva,sh} = 0,0000113 [kg/m-s]$
$\mu_{l,cond} = 0,0001127$	$\mu_{l,eva} = 0,00001077$	$\mu_{v,cond} = 0,0001054$
$\mu_{v,eva} = 0,00001115$	$m_c,cald = 0,0008681$	$m_{real} = 0,01717$
$n_2,cald = 6,099$	$NL = 18$	$NT = 4$
$Numerotubos = 72$	$v_{aire} = 0,000002922$	$v_{cond,sc} = 3,66$
$v_{cond,sh} = 11,48$	$v_{cond,w} = 24,15$	$v_{eva,aire} = 30,01$
$v_{eva,sh} = 13,55$	$n_{cald} = 0,0013$	$o2a_{cald} = 1,853$
$o2g_{cald} = 0,444$	$o_{cald} = 0,3738$	$PCI_{cald} = 18582$
$PCS_{cald} = 20133$	$P_{cond,w} = 2,442$	$P_{eva,aire} = 0,7338$
$P_{l,cond} = 1,848$	$P_{l,eva} = 0,9449$	$P_{sc,cond} = 1,959$
$P_{sh,cond} = 0,8951$	$P_{sh,eva} = 0,847$	$Psat_{eva} = 9000 [kPa]$
$Q_{cond} = 5,431 [kJ-C/kg-K]$	$Q_{eva} = 20,86$	$Q_H = 5,6$
$Q_L = 4,241$	$Q_{u,cald} = 15$	$R_{a,cond} = 2,805E+06 [C]$
$r_{cond} = 231,8 [kJ/kg]$	$rend_{ls} = 0,7992$	$Re_{BF,eva} = 74,77$
$Re_{eva,aire} = 6516$	$Re_{L,cond} = 320,8$	$Re_{l,eva} = 3,942 [1/m^2]$
$Re_{sc,cond} = 380,1$	$Re_{sh,cond} = 2460$	$Re_{sh,eva} = 3154$
$Re_{tp,cond} = 75348$	$Re_{T,cond} = 23101$	$R_{tanque} = 0,25$
$S = 0,9996$	$\sigma_{l,eva} = 0,01063$	$so2_{cald} = 0,0198$
$s_{cald} = 0,0099$	$T_a = 5 [C]$	$T_{a,cald} = 25$
$T_{cond} = 42,06 [C]$	$T_{eva} = -16,04 [C]$	$T_{g,cald} = 150$
$T_m_{cond} = 74,48 [C]$	$T_{p,cond,v} = 34,92$	$T_{p,eva} = 2$
$T_{p,eva,v} = -5,005$	$T_{sat,cond} = 29,84$	$T_{sat,eva} = -15,01$
$T_w = 40 [C]$	$U_{sc,cond} = 0,04662$	$U_{sh,cond} = 0,02985$
$U_{sh,eva} = 0,02101$	$U_{tp,cond} = 0,9967$	$U_{tp,eva} = 0,7187$
$u_{mv} = 1$	$velocidad_{aire} = 2$	$Volumen_{tanque} = 0,15$
$W_{real,compresor} = 1,7 [kJ/kg]$	$w_{cald} = 0,07$	$X = 0,9$
$X_{tt} = 0,1341$	$z_{cald} = 0,008$	

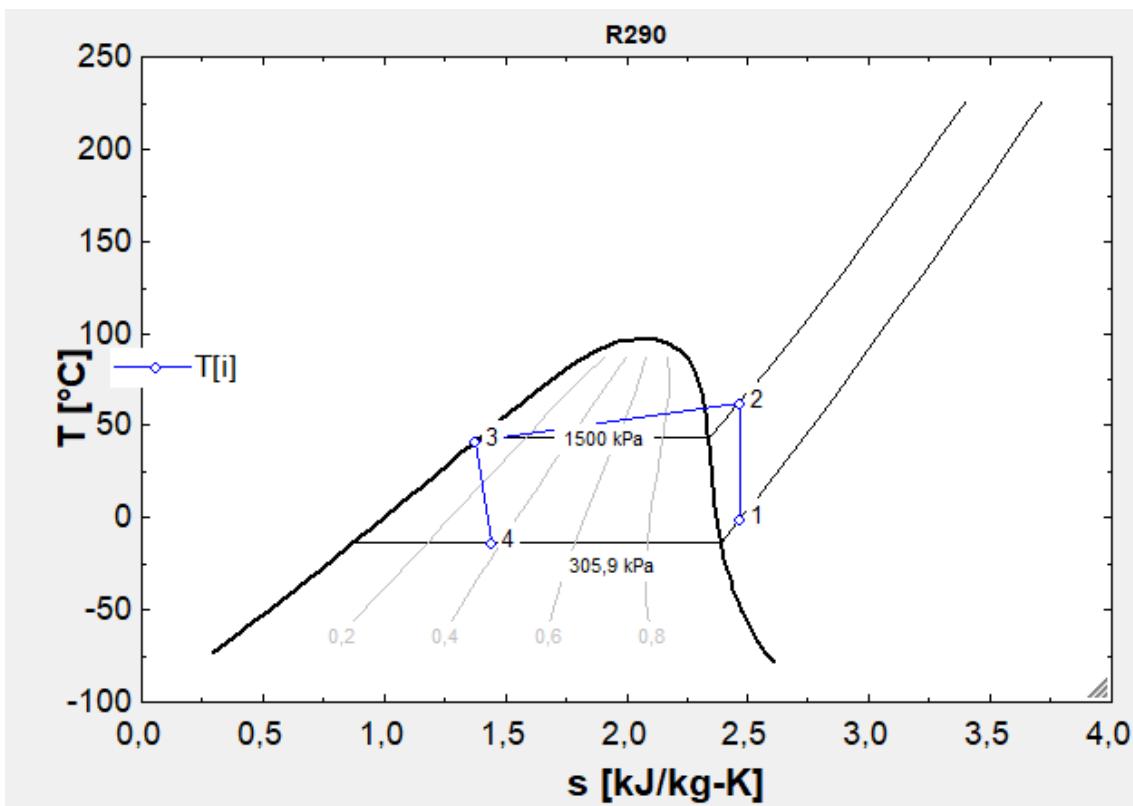


8.4. Refrigerante R-290

Sort	1 P _i [kPa]	2 h _i [kJ/kg]	3 s _i [kJ/kg-K]	4 T _i [C]	5 v _i [m ³ /kg]
[1]	305,9	580,3	2,468	-1	0,1562
[2]	1500	660,1	2,468	62,61	
[3]	1500	313,6	1,379	42	
[4]	305,9	313,6	1,442	-13,61	

$A_{i,\text{cond}} = 0,3445 \text{ [kJ/kg-K]}$ $A_{i,\text{eva}} = 0,3445 \text{ [m}^2\text{]}$ $\alpha_{fao,\text{eva}} = 61,39$
 $\alpha_{fasc,\text{cond}} = 37,86$ $\alpha_{fash,\text{cond}} = 43,26$ $\alpha_{fash,\text{eva}} = 31,93$
 $\alpha_{fatp,\text{cond}} = 1240$ $\alpha_{fatp,\text{eva}} = 1952$ $\alpha_{fa_w} = 1210$
 $\alpha_{agua} = 1,531E-07$ $A_{o,\text{cond}} = 1,87$ $A_{o,\text{eva}} = 6 \text{ [m}^2\text{]}$
 $\beta_{tanque} = 0,000466$ $b_{\text{cald}} = 0,03942$ $C = 0,683$
 $c_{aleña,\text{cald}} = 6250$ $C_{\text{cond}} = 2,218 \text{ [kJ/kg-K]}$ $C_{eva} = 1,672 \text{ [kJ/kg-K]}$
 $c_{co2,\text{cald}} = 1,734$ $COP_{\text{bomba,calor}} = 3,51$ $COP_{\text{real,bomba,calor}} = 3,484 \text{ [kg/kJ]}$
 $c_{pgs,\text{cald}} = 1,1$ $c_{pv,\text{cald}} = 2$ $c_{pz,\text{cald}} = 0,8$
 $c_{pl,\text{eva}} = 2,402$ $c_{\text{cald}} = 0,473$ $\delta p_{\text{eva}} = 104080 \text{ [Pa]}$
 $\delta T_{\text{eva}} = 14,01$ $densidad_{\text{eva}} = 3,874$ $densidad_{i,\text{cond}} = 477$
 $densidad_{i,\text{eva}} = 548,6$ $densidad_{v,\text{cond}} = 485,8$ $densidad_{v,\text{eva}} = 6,524$
 $d_{\text{cald}} = 0,0084$ $d_{\text{eva}} = 0,00852$ $d_{\text{cond}} = 0,0099$

$d_{eva} = 0,00952$	$d_{cald} = 0,1657$	$d_{r,cald} = 0,2178$
$e_{cald} = 0,315$	$\varepsilon = 1$	$\eta_{calPCI,cald} = 0,9299$
$\eta_{calPCS,cald} = 0,8583$	$\eta_{fin} = 0,95$	$e_{cald} = 0,01387$
$F = 41,42$	$\gamma_{cald} = 1,315$	$Gr = 300873$ [C]
$g_{s,cald} = 8,297$	$g_{cald} = 0,0003094$	$h_{2ov,cald} = 0,646$
$hc = 7,108$	$hen = 1945$	$h_{cald} = 0,064$
$h_{l,eva} = 163,1$	$j_{cald} = 0,03589$	$k_{cald} = 0,05792$
$k_{cond} = 50$	$k_{cond,l} = 0,09311$	$k_{cond,sc} = 0,0869$ [W/m-K]
$k_{cond,sh} = 0,02419$ [W/m-K]	$k_{cond,w} = 0,632$	$k_{est,cald} = 0,04404$
$k_{eva,aire} = 0,02379$	$k_{eva,sh} = 0,01559$ [W/m-K]	$k_{l,eva} = 0,1165$
$l_{anda,tube} = 50$	$\mu_{cald} = 0,00004305$	$L_{gs,cald} = 0,06139$
$L_{h2ov,cald} = 0,008691$	$L_{tanque} = 0,764$	$m = 0,466$
$\mu_{cond,sc} = 0,00008176$ [kg/m-s]	$\mu_{cond,sh} = 0,00001001$ [kg/m-s]	$\mu_{eva,sh} = 0,00000767$ [kg/m-s]
$\mu_{l,cond} = 0,00009438$	$\mu_{l,eva} = 0,0001508$	$\mu_{v,cond} = 0,00008901$
$\mu_{v,eva} = 0,000007565$	$m_c,cald = 0,0008681$	$m_{real} = 0,01621$
$n_{2,cald} = 6,099$	$NL = 18$	$NT = 4$
$Numerotubos = 72$	$v_{aire} = 0,00000449$	$v_{cond,sc} = 3,66$
$v_{cond,sh} = 15,03$	$v_{cond,w} = 18,96$	$v_{eva,aire} = 24,57$
$v_{eva,sh} = 17,45$	$n_{cald} = 0,0013$	$o2a_{cald} = 1,853$
$o2g_{cald} = 0,444$	$o_{cald} = 0,3738$	$PCI_{cald} = 18582$
$PCS_{cald} = 20133$	$P_{r,cond,w} = 3,542$	$P_{r,eva,aire} = 0,7338$
$P_{r,l,cond} = 2,814$	$P_{r,l,eva} = 3,108$	$P_{r,sc,cond} = 2,778$
$P_{r,sh,cond} = 0,9179$	$P_{r,sh,eva} = 0,8227$	$Psat_{eva} = 410$ [kPa]
$Q_{cond} = 5,575$ [kJ-C/kg-K]	$Q_{eva} = 18,98$	$Q_H = 5,616$
$Q_L = 4,323$	$Q_{u,cald} = 15$	$Ra_{cond} = 1,066E+06$ [C]
$r_{cond} = 298$ [kJ/kg]	$rend_{is} = 0,8078$	$Re_{BF,eva} = 27,94$
$Re_{eva,aire} = 4241$	$Re_{L,cond} = 361,8$	$Re_{l,eva} = 0,2659$ [1/m ²]
$Re_{sc,cond} = 417,6$	$Re_{sh,cond} = 3411$	$Re_{sh,eva} = 4389$
$Re_{tp,cond} = 45843$	$Re_{T,cond} = 26047$	$R_{tanque} = 0,25$
$S = 0,9999$	$\sigma_{l,eva} = 0,009706$	$so2_{cald} = 0,0198$
$s_{cald} = 0,0099$	$T_a = 5$ [C]	$T_{a,cald} = 25$
$T_{cond} = 43,99$ [C]	$T_{eva} = -13,61$ [C]	$T_{g,cald} = 150$
$T_{m,cond} = 51,31$ [C]	$T_{p,cond,v} = 34,92$	$T_{p,eva} = 2$
$T_{p,eva,v} = -5,005$	$T_{sat,cond} = 29,84$	$T_{sat,eva} = -15,01$
$T_w = 40$ [C]	$U_{sc,cond} = 0,03782$	$U_{sh,cond} = 0,04315$
$U_{sh,eva} = 0,03172$	$U_{tp,cond} = 1,097$	$U_{tp,eva} = 0,7637$
$u_{mv} = 1$	$velocidad_{aire} = 2$	$Volumen_{tanque} = 0,15$
$W_{real,compresor} = 1,6$ [kJ/kg]	$w_{cald} = 0,07$	$X = 0,9$
$X_{tt} = 0,02036$	$z_{cald} = 0,008$	

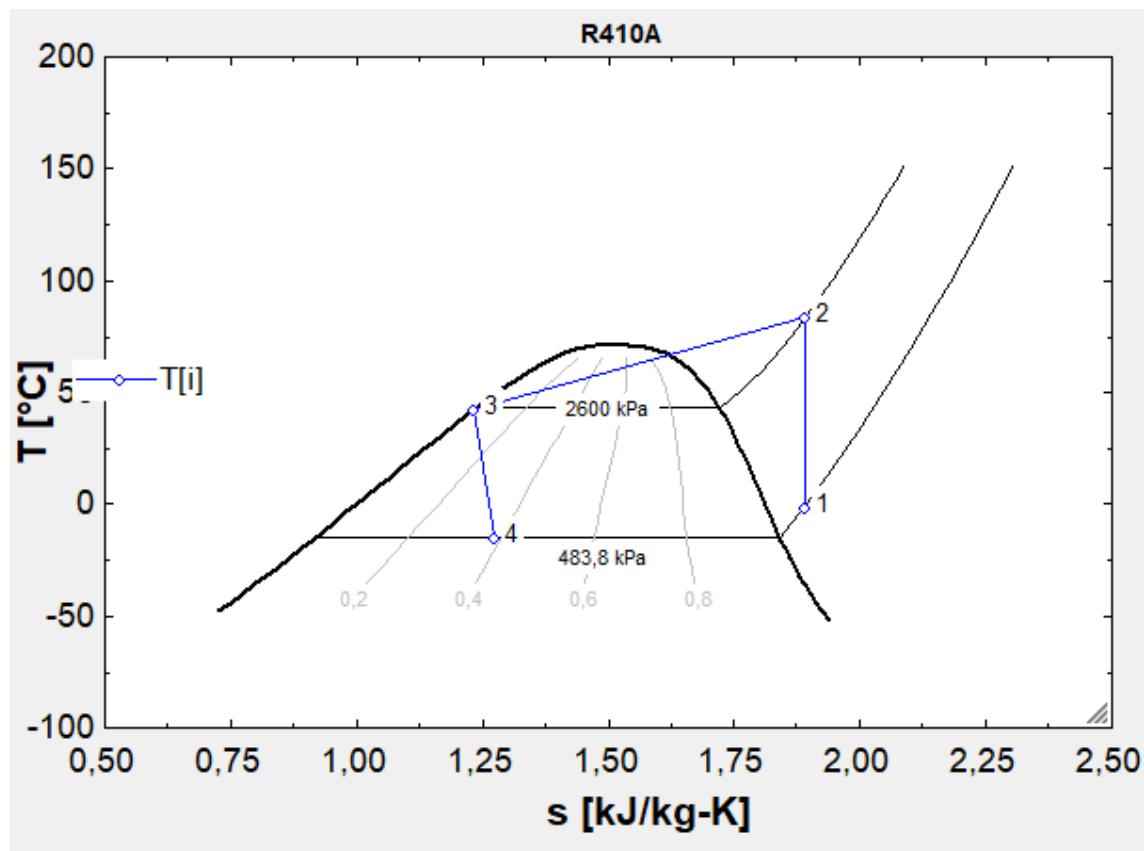


8.5. Refrigerante R-410-a

Sort	1 P _i [kPa]	2 h _i [kJ/kg]	3 s _i [kJ/kg-K]	4 T _i [C]	5 v _i [m ³ /kg]
[1]	483,8	429,6	1,891	-1	0,05832
[2]	2600	481,3	1,891	83,32	
[3]	2600	270	1,232	42	
[4]	483,8	270	1,274	-14,84	

$A_{i,\text{cond}} = 0,3445 \text{ [kJ/kg-K]}$ $A_{i,\text{eva}} = 0,3445 \text{ [m}^2\text{]}$ $\alpha_{o,\text{eva}} = 76,01$
 $\alpha_{fasc,\text{cond}} = 33,23$ $\alpha_{fash,\text{cond}} = 29,97$ $\alpha_{fash,\text{eva}} = 22,04$
 $\alpha_{atp,\text{cond}} = 1016$ $\alpha_{atp,\text{eva}} = 2873$ $\alpha_{w} = 1424$
 $\alpha_{\text{agua}} = 1,564E-07$ $A_{o,\text{cond}} = 1,87$ $A_{o,\text{eva}} = 6 \text{ [m}^2\text{]}$
 $\beta_{\text{tanque}} = 0,0005324$ $b_{\text{cald}} = 0,03942$ $C = 0,683$
 $c_{\text{aleña,cald}} = 6250$ $C_{\text{cond}} = 1,189 \text{ [kJ/kg-K]}$ $C_{\text{eva}} = 0,9347 \text{ [kJ/kg-K]}$
 $c_{\text{co2,cald}} = 1,734$ $COP_{\text{bomba,calor}} = 3,274$ $COP_{\text{real,bomba,calor}} = 3,201 \text{ [kg/kJ]}$
 $c_{\text{pgs,cald}} = 1,1$ $cp_{v,\text{cald}} = 2$ $cp_{z,\text{cald}} = 0,8$
 $c_{\text{pl,eva}} = 1,453$ $c_{\text{cald}} = 0,473$ $\delta p_{,\text{eva}} = 216200 \text{ [Pa]}$
 $\delta T_{,\text{eva}} = 14,01$ $densidad_{\text{eva}} = 6,126$ $densidad_{l,\text{cond}} = 1012$
 $densidad_{l,\text{eva}} = 1227$ $densidad_{v,\text{cond}} = 1042$ $densidad_{v,\text{eva}} = 17,53$
 $d_{\text{cond}} = 0,0084$ $d_{\text{eva}} = 0,00852$ $d_{\text{cond}} = 0,0099$

$d_{eva} = 0,00952$	$d_{cald} = 0,1657$	$d_{r,cald} = 0,2178$
$e_{cald} = 0,315$	$\epsilon = 1$	$\eta_{calPCI,cald} = 0,9299$
$\eta_{calPCS,cald} = 0,8583$	$\eta_{fin} = 0,95$	$e_{cald} = 0,01387$
$F = 38,99$	$\gamma_{cald} = 1,315$	$Gr = 644722 [C]$
$g_s,cald = 8,297$	$g_{cald} = 0,0003094$	$h_{2ov,cald} = 0,646$
$h_c = 5,691$	$h_{en} = 2868$	$h_{cald} = 0,064$
$h_{l,eva} = 177,7$	$j_{cald} = 0,03589$	$k_{cald} = 0,05792$
$k_{cond} = 50$	$k_{cond,l} = 0,08579$	$k_{cond,sc} = 0,07627 [W/m-K]$
$k_{cond,sh} = 0,02033 [W/m-K]$	$k_{cond,w} = 0,6425$	$k_{est,cald} = 0,04404$
$k_{eva,aire} = 0,02379$	$k_{eva,sh} = 0,01191 [W/m-K]$	$k_{l,eva} = 0,1124$
$l_{anda,tube} = 50$	$L_{ce,cald} = 0,00004305$	$L_{gs,cald} = 0,06139$
$L_{h2ov,cald} = 0,008691$	$L_{tanque} = 0,764$	$m = 0,466$
$\mu_{cond,sc} = 0,00009794 [kg/m-s]$	$\mu_{cond,sh} = 0,00001594 [kg/m-s]$	$\mu_{eva,sh} = 0,00001115 [kg/m-s]$
$\mu_{l,cond} = 0,0001172$	$\mu_{eva} = 0,0001998$	$\mu_{v,cond} = 0,0001092$
$\mu_{v,eva} = 0,00001098$	$m_{c,cald} = 0,0008681$	$m_{real} = 0,02015$
$n_2,cald = 6,099$	$NL = 18$	$NT = 4$
$Numerotubos = 72$	$v_{aire} = 0,000002839$	$v_{cond,sc} = 3,66$
$v_{cond,sh} = 12,38$	$v_{cond,w} = 21,93$	$v_{eva,aire} = 30,42$
$v_{eva,sh} = 15,78$	$n_{cald} = 0,0013$	$o2a_{cald} = 1,853$
$o2g_{cald} = 0,444$	$o_{cald} = 0,3738$	$PCI_{cald} = 18582$
$PCS_{cald} = 20133$	$Pr_{cond,w} = 2,963$	$Pr_{eva,aire} = 0,7338$
$Pr_{l,cond} = 2,364$	$Pr_{l,eva} = 2,582$	$Pr_{sc,cond} = 2,545$
$Pr_{sh,cond} = 0,9321$	$Pr_{sh,eva} = 0,8755$	$Psat_{eva} = 700 [kPa]$
$Q_{cond} = 4,162 [kJ-C/kg-K]$	$Q_{eva} = 27,48$	$Q_H = 4,257$
$Q_L = 3,215$	$Q_{u,cald} = 15$	$R_{a,cond} = 1,910E+06 [C]$
$r_{cond} = 153,1 [kJ/kg]$	$rend_{ls} = 0,8014$	$Re_{BF,eva} = 24,3$
$Re_{eva,aire} = 6707$	$Re_{L,cond} = 362,2$	$Re_{l,eva} = 0,2494 [1/m^2]$
$Re_{sc,cond} = 433,2$	$Re_{sh,cond} = 2662$	$Re_{sh,eva} = 3751$
$Re_{tp,cond} = 80183$	$Re_{T,cond} = 26075$	$R_{tanque} = 0,25$
$S = 0,9999$	$\sigma_{l,eva} = 0,008955$	$so2_{cald} = 0,0198$
$s_{cald} = 0,0099$	$T_a = 5 [C]$	$T_{a,cald} = 25$
$T_{cond} = 42,89 [C]$	$T_{eva} = -14,78 [C]$	$T_{g,cald} = 150$
$T_{m,cond} = 61,66 [C]$	$T_{p,cond,v} = 34,92$	$T_{p,eva} = 2$
$T_{p,eva,v} = -5,005$	$T_{sat,cond} = 29,84$	$T_{sat,eva} = -15,01$
$T_w = 40 [C]$	$U_{sc,cond} = 0,0332$	$U_{sh,cond} = 0,02993$
$U_{sh,eva} = 0,02196$	$U_{tp,cond} = 0,9295$	$U_{tp,eva} = 1,006$
$u_{mv} = 1$	$velocidad_{aire} = 2$	$Volumen_{tanque} = 0,15$
$W_{real,compresor} = 1,3 [kJ/kg]$	$w_{cald} = 0,07$	$X = 0,9$
$X_{tt} = 0,02211$	$z_{cald} = 0,008$	



9. Modelado caldera de biomasa.

Caldera de Biomasa

Combustión 6b

datos biomasa

$$c_{\text{cald}} = 0,473$$

$$o_{\text{cald}} = 0,3738$$

$$h_{\text{cald}} = 0,064$$

$$n_{\text{cald}} = 0,0013$$

$$w_{\text{cald}} = 0,07$$

$$z_{\text{cald}} = 0,008$$

$$s_{\text{cald}} = 0,0099$$

$$PCI_{\text{cald}} = 18582,23 \text{ kJ/kg}$$

$$ea_{\text{cald}} = 0,315$$

$$\gamma_{\text{cald}} = 1 + ea_{\text{cald}}$$

$$Tg_{\text{cald}} = 133 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Ta_{\text{cald}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$cp_{gs\text{cald}} = 1,1 \text{ kJ/kgK}$$

$$cp_{v\text{cald}} = 2 \text{ kJ/kgK}$$

$$cp_{z\text{cald}} = 0,8 \text{ kJ/kgK}$$

$$PCS_{\text{cald}} = PCI_{\text{cald}} = 2442 \cdot (w_{\text{cald}} + 9 \cdot h_{\text{cald}})$$

$$Q_{u;\text{cald}} = 10$$

$$\frac{c_{\text{cald}}}{12} = b_{\text{cald}}$$

$$h_{\text{cald}} + \frac{w_{\text{cald}}}{18} = 2 \cdot j_{\text{cald}}$$

$$\frac{s_{\text{cald}}}{32} = g_{\text{cald}}$$

$$\frac{o_{\text{cald}}}{16} + 2 \cdot k_{\text{est;cald}} + \frac{w_{\text{cald}}}{18} = 2 \cdot b_{\text{cald}} + j_{\text{cald}} + 2 \cdot g_{\text{cald}}$$

$$\frac{n_{\text{cald}}}{14} + 2 \cdot 3,76 \cdot k_{\text{est;cald}} = 2 \cdot d_{\text{cald}}$$

$$k_{\text{cald}} = \gamma_{\text{cald}} \cdot k_{\text{est;cald}}$$

$$\frac{o_{\text{cald}}}{16} + 2 \cdot k_{\text{cald}} + \frac{w_{\text{cald}}}{18} = 2 \cdot b_{\text{cald}} + j_{\text{cald}} + 2 \cdot g_{\text{cald}} + 2 \cdot e_{\text{cald}}$$

$$\frac{n_{\text{cald}}}{14} + 2 \cdot 3,76 \cdot k_{\text{cald}} = 2 \cdot d_{r;\text{cald}}$$

Coefficientes en kg/kg biomasa, una vez constituido el BM

$$co2_{cald} = b_{cald} + 44$$

$$h2ov_{cald} = j_{cald} + 18$$

$$o2g_{cald} = e_{cald} + 32$$

$$o2a_{cald} = k_{cald} + 32$$

$$n2_{cald} = d_{r,cald} + 28$$

$$so2_{cald} = g_{cald} + 64$$

$$gs_{cald} = co2_{cald} + n2_{cald} + o2g_{cald} + so2_{cald}$$

$$L_{gs;cald} = gs_{cald} \cdot cp_{gs} \cdot \left[\frac{Tg_{cald} - Ta_{cald}}{PCI_{cald}} \right]$$

$$L_{h2ov;cald} = h2ov_{cald} \cdot cpv_{cald} \cdot \left[\frac{Tg_{cald} - Ta_{cald}}{PCI_{cald}} \right]$$

$$L_{ce;cald} = z_{cald} \cdot cpz_{cald} \cdot \left[\frac{Tg_{cald} - Ta_{cald}}{PCI_{cald}} \right]$$

$$\eta_{calPCI;cald} = 1 - L_{gs;cald} - L_{h2ov;cald} - L_{ce;cald}$$

$$\eta_{calPCI;cald} \cdot PCI_{cald} = \eta_{calPCS;cald} \cdot PCS_{cald}$$

$$\eta_{calPCI;cald} = \frac{Q_u;cald}{m_c;cald \cdot PCI_{cald}}$$

$$ca_{pellets;cald} = m_c;cald \cdot 3600 \text{ kg pellets/hora}$$

$$b_{cald} = 0,03942$$

$$ca_{pellets,cald} = 2,062$$

$$co2_{cald} = 1,734$$

$$cp_{gs}{}_{cald} = 1,1$$

$$cpv_{cald} = 2$$

$$cpz_{cald} = 0,8$$

$$c_{cald} = 0,473$$

$$d_{cald} = 0,1657$$

$$d_{r,cald} = 0,2178$$

$$e_{cald} = 0,315$$

$$\eta_{calPCI,cald} = 0,9394$$

$$\eta_{calPCS,cald} = 0,8659$$

$$e_{cald} = 0,01387$$

$$\gamma_{cald} = 1,315$$

$$gs_{cald} = 8,297$$

$$g_{cald} = 0,0003094$$

$$h2ov_{cald} = 0,646$$

$$h_{cald} = 0,064$$

$$j_{cald} = 0,03589$$

$$k_{cald} = 0,05792$$

$$k_{est,cald} = 0,04404$$

$$L_{ce,cald} = 0,0000372$$

$$L_{gs,cald} = 0,05305$$

$$L_{h2ov,cald} = 0,007509$$

$$m_c;cald = 0,0005729$$

$$n2_{cald} = 6,099$$

$$n_{cald} = 0,0013$$

$$o2a_{cald} = 1,853$$

$$o2g_{cald} = 0,444$$

$$o_{cald} = 0,3738$$

$$PCI_{cald} = 18582$$

$$PCS_{cald} = 20160$$

$$Q_u;cald = 10$$

$$so2_{cald} = 0,0198$$

$$s_{cald} = 0,0099$$

$$Ta_{cald} = 25$$

$$Tg_{cald} = 133$$

$$w_{cald} = 0,07$$

$$z_{cald} = 0,008$$

10. Características comerciales equipos seleccionados.

Caldera de pellets:



Principales características:

- Para pellet.
- 4 potencias: 10, 16, 25 y 43 kW.
- Modulación electrónica.
- Limpieza automática Grinder.

Características	BioClass HM 10
Potencia nominal (kW)	10.1
Rendimiento a potencia nominal (%)	93.5
Potencia carga parcial (kW)	2.9
Rendimiento a carga parcial (%)	89.5
Potencia eléctrica (W)	485

Bomba de calor:

-Unidad interior



UNIDADES INTERIORES (HIDROKIT)			EHBX04CB3V	EHBX08CB3V		EHBX11CB3V
CON UNIDADES EXTERIORES MODELOS:			ERLQ004CV3	ERLQ006CV3	ERLQ008CV3	ERLQ011CV3
Dimensiones	Al.xAn.xF.	mm	890 x 480 x 344	890 x 480 x 344	890 x 480 x 344	890 x 480 x 344
Peso		Kg	44	46	46	43
Presión sonora	Refrig. / Calef.	dB(A)	26 / 26	26 / 26	26 / 26	27 / 27
Diámetro tubería agua		Pulgadas	1-1/4"	1-1/4"	1-1/4"	1-1/4"
Precio	€		2.138,00 €		2.252,00 €	2.435,00 €

-Unidad exterior



UNIDADES EXTERIORES MONOFÁSICAS			ERHQ011BV3			
CON UNIDADES INTERIORES MODELO:			EHBX11CB3V			
Temperatura	ambiente	impulso	Capacidad Nominal/Consumo kW	10,30 / 3,06		
Calefacción	7	45	COP	3,37		
	7	35	Capacidad Nominal/Consumo kW	11,20 / 2,46		
Refrigeración	35	7	COP	4,55		
	35	18	Capacidad Nominal/Consumo kW	10,00 / 3,60		
	35	7	EER	2,78		
	35	18	Capacidad Nominal/Consumo kW	13,90 / 3,79		
Refrigerante R-410A			EER	3,67		
Dimensions			kg / TCO_eq / PCA	2,7 / 5,6 / 2.087,5		
Peso	Al.xAn.xF.		mm	1.170 x 900 x 320		
Compresor			Kg	103		
Potencia sonora	Refrig. / Calef.			SCROLL		
Presión sonora	Refrig. / Calef.		dB(A)	64 / 64		
Alimentación eléctrica			dB(A)	50 / 49		
Conexión Refrigerante	Líquido - Gas		I / 220 V (monofásico)			
Distancias línea refrigerante			mm	Ø 9,5 (3/8") - Ø 15,9 (5/8")		
Clase de eficiencia energética 55°C LOT1			m	5< d < 75		
Clase de eficiencia energética 35°C LOT1						
Precio	€		A+	A		
			3.384,00 €			

-Acumulador



MODELO		EKHW5150B3V3
Volumen		150
Material		Acero inoxidable
Dimensiones	Alto	900
	Ancho / Diámetro	580
	Fondo	-
Temperatura máxima agua	Peso en vacío	37
	Presión máxima a.c.s.	80
	Resistencia apoyo	6
Conexiones hidráulicas / Conexión sensores	3kW 220V	
	Compatibilidad energía solar	3/4" / 1/2"
	Recuperación calor calefacción	No
Clase eficiencia energética LOT2		No
		C
Precio	€	1.390,00 €