

5. SIMULACIÓN

5.1 Descripción del programa

La simulación numérica del sistema se lleva a cabo gracias a una plataforma de simulación desarrollada en el Instituto de Termodinámica de la Universidad de Braunschweig para el modelado de sistemas de climatización, así como sistemas compuestos por una bomba de calor. El sistema es definido a través de diferentes componentes gráficos tomados de una biblioteca y los correspondientes sistemas de ecuaciones son resueltos por métodos numéricos.

Una vez modelados los componentes del sistema en cuestión, el programa debe resolver sistemas de ecuaciones algebraicas a partir de determinados valores iniciales dados por el usuario. El sistema devuelve unos llamados residuos que permitirán al usuario determinar si la respuesta del sistema es adecuada a lo esperado. El usuario debe variar los valores iniciales hasta que los residuos se acerquen lo más posible a cero.

Para llevar a cabo la optimización de la instalación deben introducirse todos los parámetros relativos a los distintos componentes que vamos a considerar. A través de la variación del área de paso de la válvula de expansión se puede obtener la presión óptima para el funcionamiento de la bomba de calor. En la simulación llevada a cabo en este proyecto van a considerarse las siguientes variables:

- Fuente de calor: Agua o aire
- Evaporador: de aire o de agua
- Temperatura del agua a la salida del enfriador de gas: 35°C, 55 ó 60°C
- Temperatur del aire a la entrada del evaporador (sólo Agua/Aire): aproximadamente entre -15°C y 40°C

Variando la presión de alta con condiciones constantes en el resto del sistema se lleva a cabo la optimización de la instalación con respecto al COP de la misma.

El programa de simulación ofrece los siguientes resultados, entre otros:

- caudales máxicos (agua en el enfriador de gas, CO₂ a través de todo el ciclo primario, aire o agua en el evaporador)
- Entalpía específica del CO₂
- Consumo del Compresor P_{CP}
- Potencia en el enfriador de gas Q_{EG}
- Presión de alta y de baja
- Temperatura del CO₂
- Temperatura del agua (así como del aire) en el enfriador de gas y el evaporador

En este trabajo resultan especialmente de interés los valores de potencia en el enfriador de gas, así como el consumo del compresor para llevar a cabo el cálculo del COP.

5.2 Cálculo del COP anual

Para llevar a cabo el cálculo del COP anual se procede del siguiente modo: En primer lugar, con los datos obtenidos en el programa de simulación para cada presión de alta, se calcula el COP como se describe a continuación, donde P_{aux} representa el consumo de los equipos auxiliares.

$$COP = \frac{Q_{EG}}{P_{CP} + P_{aux}}$$

Una vez obtenido el COP para cada presión de alta, podemos indentificar el COP máximo al que puede trabajar la instalación. Tendremos que llevar a cabo la simulación para diferentes casos:

- Bomba de calor Agua/Agua

En este caso, la temperatura de entrada del agua en el evaporador es considerada constante e igual a 10°C. De esta forma se obtiene un COP óptimo para cada caso de estudio. La siguiente tabla muestra dichos valores.

Servicio	COP _{opt}
35°C	3,3
55°C	2,59
60°C	2,46

Tabla 5.1: COP óptimo para cada temperatura de servicio del agua

En lo que sigue, se tomarán estos valores de COP cuando se considere que la bomba de calor refrigerada por agua está llevando a cabo cada uno de esos servicios. A partir de esos valores y la demanda anteriormente calculada en cada ciudad se calcula el COP anual en cada instalación y en cada zona climática. El cálculo se realiza como se describe a continuación:

$$P_{CP1} = \frac{\text{Demanda Calefacción}}{COP_{opt \text{ Calefacción}}} \quad \text{y} \quad P_{CP2} = \frac{\text{Demanda ACS}}{COP_{opt-ACS}}$$

Se calcula de esa forma el consumo del compresor para satisfacer tanto la demanda de calefacción como la de A.C.S. con un COP óptimo. La suma de ambos valores nos da el consumo total del compresor a lo largo del año:

$$P_{CP} = P_{CP1} + P_{CP2}$$

Con este valor y la demanda total de la instalación se calcula el COP anual de la misma:

$$COP_{anual} = \frac{\text{Demanda total}}{P_{CP}}$$

De esta forma se obtienen los valores correspondientes a cada Instalación en cada ciudad objeto de estudio:

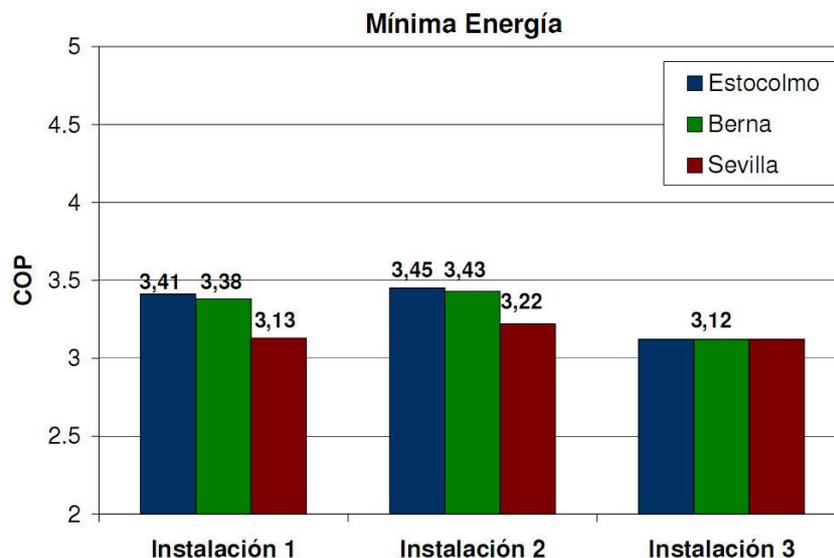


Figura 5.1: COP anual en las tres ciudades y las diferentes instalaciones en casas de Mínima Energía

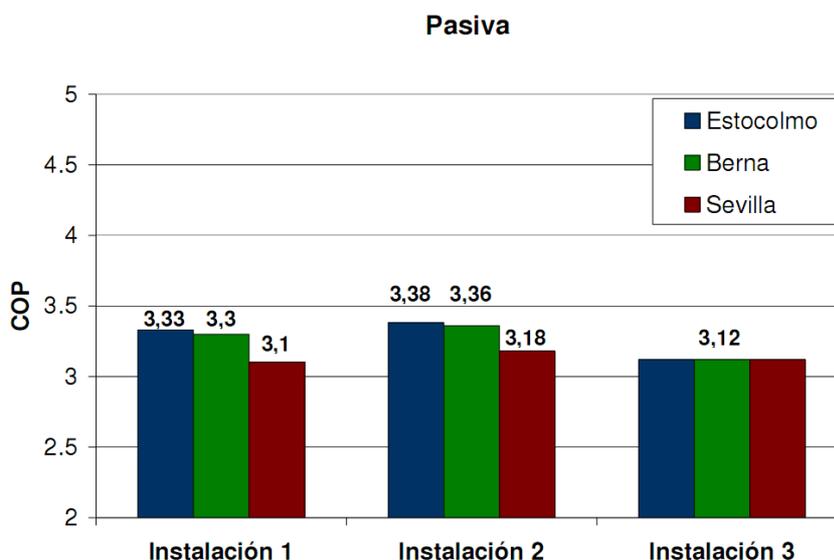


Figura 5.2: COP anual en las tres ciudades y las diferentes instalaciones en casas Pasivas

- Bomba de calor Agua/Aire

En este caso hay que tener en cuenta la variación de la temperatura exterior. Por este motivo se llevan a cabo simulaciones variando todos los parámetros que tuvimos en consideración para la bomba de calor refrigerada por agua pero para diferentes temperaturas del aire a la entrada del evaporador. Es decir, haremos la optimización en función de la presión de alta para diferentes temperaturas del aire, a partir de -15°C en saltos de cinco grados hasta 40°C . Para cada una de estas temperaturas obtendremos una presión para la cual el COP es máximo y el correspondiente valor de éste COP_{opt} . En la siguiente figura se muestran en azul las líneas correspondientes a cada temperatura exterior y en rojo la línea que una los

valores máximos (el caso representado en la figura es la producción de agua caliente para calefacción a 35°C).

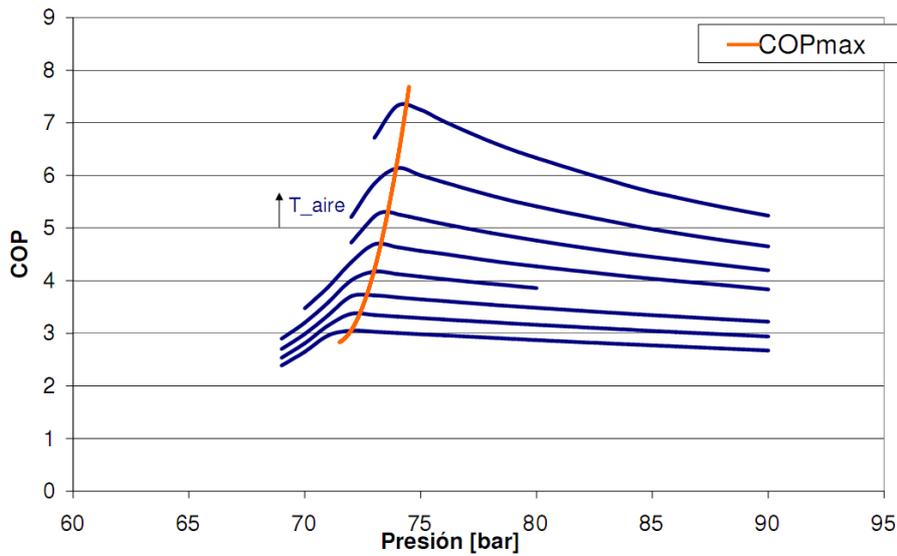


Figura 5.3: Curvas de COP en función de la presión y curva de COP óptimo para cada temperatura

Una vez que disponemos de esos valores máximos para cada temperatura realizaremos una aproximación cuadrática a partir de la cual podremos calcular el COP_{opt} para cada temperatura exterior. De esta forma, y puesto que disponemos tanto de los valores de demanda como de la temperatura exterior cada hora del año, llegamos a los valores calculados anteriormente pero para cada hora.

En la siguiente figura 5.4 están representadas las curvas de COP óptimo en función de la temperatura exterior para todos los servicios:

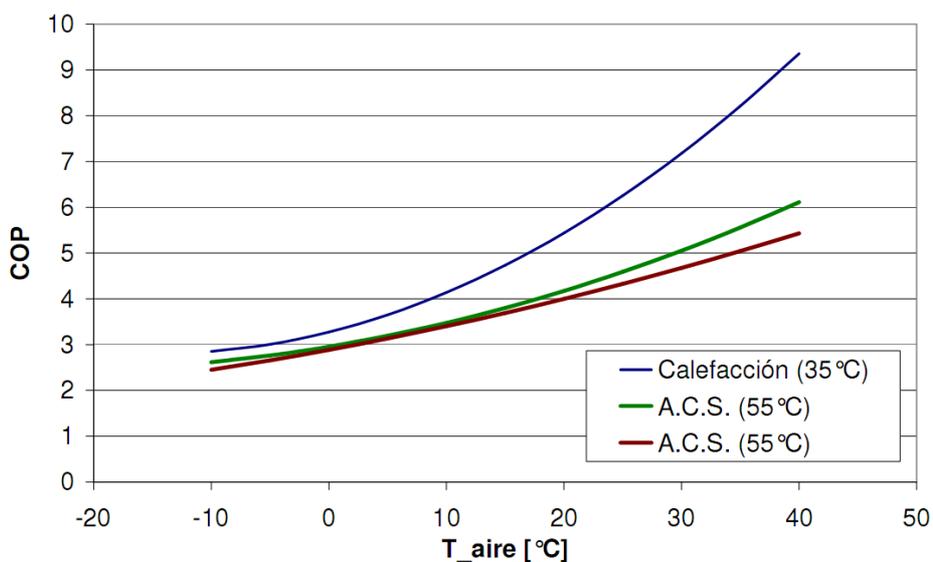


Figura 5.4: COP óptimo en función de la Temperatura exterior para los distintos servicios

Sumando los valores por cada hora obtenemos el consumo total del compresor para cada servicio y podemos volver a usar las ecuaciones anteriores para el cálculo del COP anual.

$$COP_{anual} = \frac{Demanda\ total}{\sum P_{CP1} + \sum P_{CP2}}$$

Al igual que en el caso de la bomba de calor Agua/Agua obtenemos el COP anual en cada ciudad para cada instalación. Dichos valores se encuentran representados en las siguientes figuras (5.5 y 5.6):

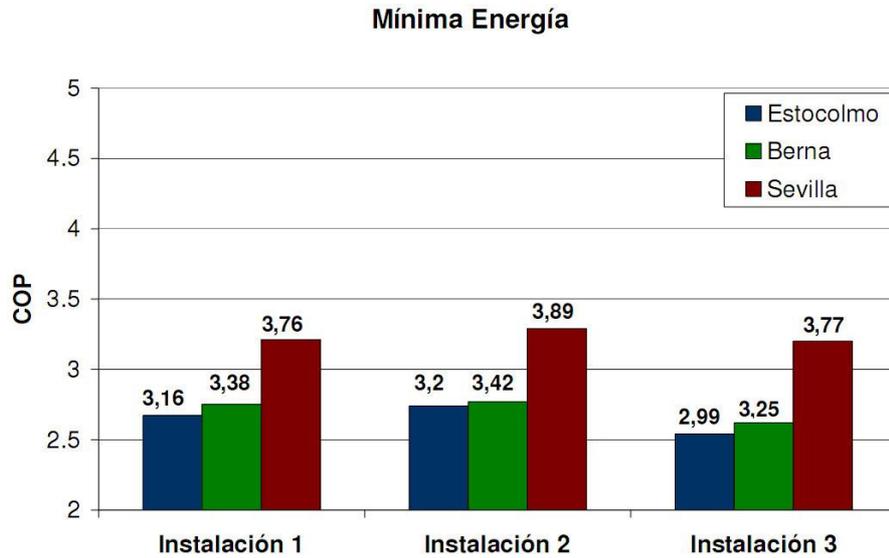


Figura 5.5: COP anual en las tres ciudades y las diferentes instalaciones en casas de Mínima Energía

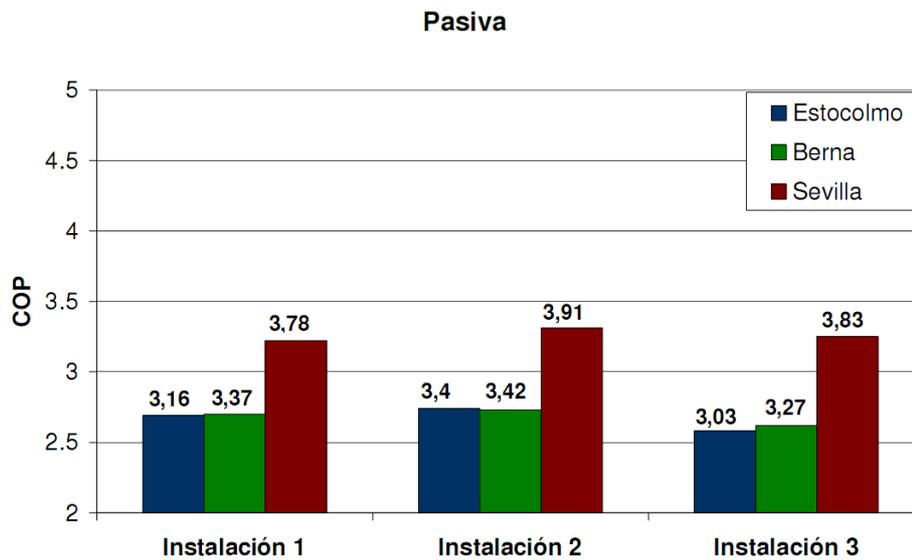


Figura 5.6: COP anual en las tres ciudades y las diferentes instalaciones en casas Pasivas

5.3 Refrigeración

Como se explicó anteriormente, el estudio del funcionamiento de la bomba de calor en modo frío va a llevarse a cabo únicamente en Sevilla. Debido a esto y en vista de los resultados expuestos en el apartado anterior se llevará a cabo el estudio en la Instalación 2 con una bomba de calor Agua/Aire, que es la que mejor eficiencia en la producción de agua caliente para calefacción y A.C.S. presenta en Sevilla.

Para la determinación del COP en este caso vamos a utilizar una aplicación de Excell (TILFluids2XLL) que nos permite identificar los valores de las distintas propiedades termodinámicas de un fluido (en este caso el CO₂) a partir de dos de ellas (por ejemplo presión y temperatura).

Para llevar a cabo este estudio se tomarán una serie de simplificaciones y suposiciones:

- Presión constante en el evaporador de 40 bar
- Sobrecalentamiento constante de 5K
- Variación de la temperatura exterior entre 25°C y 41°C
- Temperatura de salida del CO₂ en el enfriador de gas $\sigma_{CO_2,GK} = \sigma_{aire} + 3K$
- Variación de la presión para la obtención del punto óptimo de funcionamiento

A partir de estas suposiciones se llevará a cabo el cálculo del COP óptimo a partir de la temperatura exterior y de la presión de alta. Para llevar esto a cabo basta utilizar la aplicación de Excell y localizar los valores de entalpía en todos los puntos de interés, así como la masa que recorre los circuitos primario y secundario. De este modo, se puede calcular para cada caso el consumo del compresor, el calor absorbido por el enfriador de gas (en este caso actuando como evaporador) y con estos dos valores, el COP para las diferentes temperaturas consideradas y las diferentes presiones. A partir de dichos valores se obtienen las curvas en azul de la siguiente gráfica. La curva en rojo es la aproximación de los valores máximos, cuya función será utilizada para calcular el COP óptimo para cada temperatura exterior.

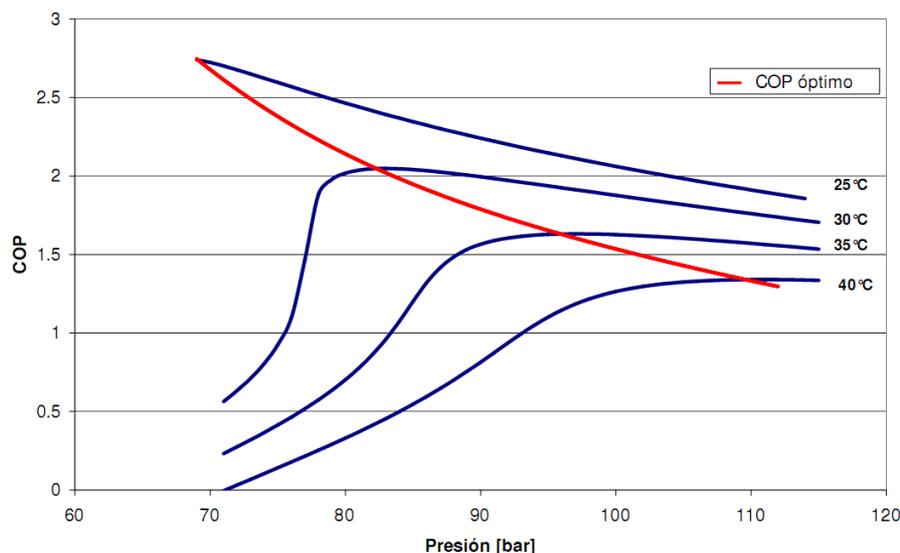


Figura 5.7: Curvas de COP óptimo en función de la presión y curva de COP óptimo para cada temperatura exterior en el caso de refrigeración

A partir de este COP óptimo se procede igual que en el capítulo anterior. En este caso, para llevar a cabo el cálculo del COP anual hay que tener en cuenta la demanda de A.C.S., de calefacción y de refrigeración a lo largo del año, así como el consumo necesario para que el compresor produzca dichas cantidades de energía. En verano la bomba de calor producirá A.C.S. de noche, llenando así el acumulador; y de día funcionará en ciclo inverso para la producción de frío.

	Mínima Energía		Pasiva	
	Demanda [kWh/a]	PVD [kWh/a]	Demanda [kWh/a]	PVD [kWh/a]
Refrigeración	3710,84	1687,53	7452,55	2911,85
Calefacción	739,79	235,79	443,87	141,47
A.C.S.	2838,42	850,62	2838,42	850,62
Suma	7289,05	2771,95	10734,85	3903,94
	$COP_{minEn} =$	2,63	$COP_{Pas} =$	2,75

Tabla 5.2: COP anual en Sevilla incluyendo la refrigeración en verano

Considerando la producción de frío en Sevilla disminuye considerablemente el COP de la instalación. En sistemas de bomba de calor, el rendimiento relativo a la calefacción es siempre superior al que se puede obtener en la producción de frío. Aún así, comparando los resultados de COP obtenidos mediante estos cálculos, con sistemas de refrigeración con fan coils existentes en el mercado (marca Carrier), éstos no difieren mucho de aquéllos. De ese modo, se puede concluir que podría usarse la bomba de calor para calefacción/refrigeración.

5.4 Valoración y comparación de los resultados

La tabla 5.3 muestra el COP anual en cada caso concreto considerado en este proyecto (sin tener en cuenta la refrigeración en Sevilla). A la vista de dichos resultados se puede concluir que cuanto menor es la temperatura del agua a la salida del enfriador de gas, mayor es el COP de la instalación. De este modo, Instalación 2 se convierte en la más eficiente para la producción de energía.

		Mínima Energía			Pasiva		
		Inst. 1	Inst. 2	Inst. 3	Inst. 1	Inst.2	Inst. 3
Bomba de calor	Estocolmo	2.67	2.74	2.54	2.69	2.74	2.58
	Sevilla	2.75	2.77	2.62	2.7	2.73	2.62
Agua/Aire	Berna	3.21	3.29	3.2	3.22	3.31	3.25
Bomba de calor	Estocolmo	3.41	3.45	3.12	3.33	3.38	3.12
	Sevilla	3.38	3.43	3.12	3.3	3.36	3.12
	Agua/Agua	Berna	3.13	3.22	3.12	3.1	3.18

Tabla 5.3: Valores de COP anual en todos los casos de estudio

En el caso de la bomba de calor Agua/Agua, los valores de COP anual son siempre mayores cuando consideramos una vivienda de Mínima Energía, aunque la demanda es inferior en casas Pasivas. El motivo de que el COP sea mayor, es la mayor proporción de demanda de calefacción con respecto a la demanda total del edificio. Como puede verse en la tabla 5.1 el COP con el que trabaja la instalación para la producción de agua para calefacción es superior a cuando produce A.C.S. Por este motivo el COP es superior en viviendas de Mínima Energía.

Los resultados relativos a la bomba de calor Agua/Aire son algo diferentes. En este caso el valor del COP depende de la temperatura exterior, como muestra la gráfica 5.4. Para una temperatura concreta del aire, el COP relativo a la producción de agua para calefacción es mayor que el correspondiente a A.C.S. Sin embargo, a partir de una determinada temperatura del aire no existe demanda de calefacción, aunque sí de A.C.S. Por este motivo, cuando la temperatura exterior es relativamente alta, el COP con el que trabaja la instalación en la producción de A.C.S. es mayor que el relativo a la producción de agua para calefacción. De esta manera, se puede concluir que en el caso de la bomba de calor refrigerada por aire, el COP no es obligatoriamente mayor en el caso de viviendas de Mínima Energía, sino que depende de la temperatura exterior.

Estocolmo

Como puede valorarse en la tabla 5.3, el COP en Estocolmo es mayor en el caso de la bomba de calor refrigerada por agua. El motivo de esto son las bajas temperaturas exteriores a lo largo del año. La temperatura a la que hemos considerado el agua del ciclo secundario en el evaporador es en término medio superior a la temperatura exterior, de modo que la bomba de calor puede trabajar de manera más eficiente.

Berna

En el caso de Berna, la temperatura exterior a lo largo del año no es tan extrema como en el caso de Estocolmo, pero aún así la media está por debajo de 10 °C, temperatura a la que hemos considerado el agua corriente. Por este motivo, el COP relativo a la bomba de calor Agua/Agua es mayor que el referente a la bomba de calor Agua/Aire.

Sevilla

La situación en Sevilla es totalmente diferente debido a las altas temperaturas, que en término medio están por encima de 10°C. Por este motivo, es en este caso la bomba de calor refrigerada por aire, la que mejor servicio puede ofrecer.

5.5 Emisiones de CO₂ y ahorro de energía primaria

A partir de los valores de COP anual de cada instalación, de la demanda de energía y de los datos de rendimiento relativos a instalaciones de gas y aceite, se llevará a cabo el cálculo del consumo de energía primaria de la bomba de calor, así como de las emisiones de CO₂ y se realizará una comparación de dichos valores con los relativos a instalaciones convencionales de gas y de aceite.

En los siguientes gráficos se muestran los resultados obtenidos en las tres ciudades de estudio. Las diferentes barras muestran el consumo de energía primaria de cada instalación, el consumo de energía final y las emisiones de CO₂. Los distintos sistemas representados en el eje de abscisas son las instalaciones convencionales de gas y de aceite; así como la bomba de calor, tanto refrigerada por agua como por aire, en

el caso de las Instalaciones 2 y 3. La Instalación 2 es la que trabaja con el COP más alto de las que hemos estudiado, y la Instalación 3 resulta de interés debido al uso de convectores para calefacción, ya que el suelo radiante no es una opción tan común en la práctica.

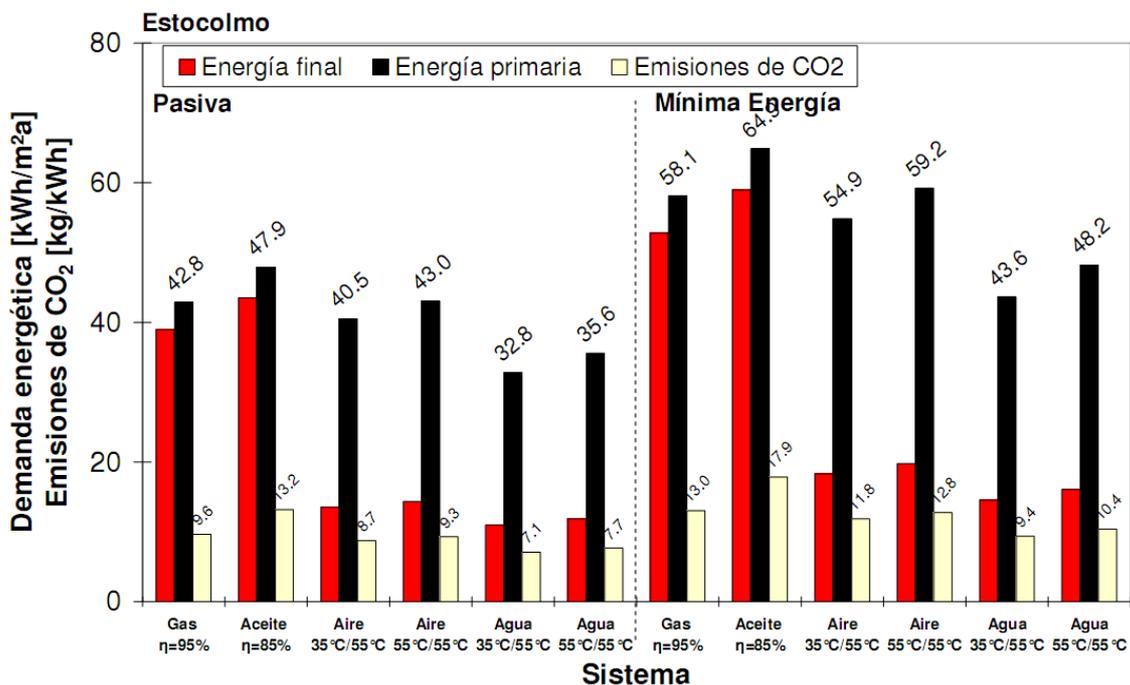


Figura 5.8: Demanda energética y emisiones de CO₂ en diferentes sistemas de producción de energía para sistemas Pasivos y de Mínima Energía en Estocolmo

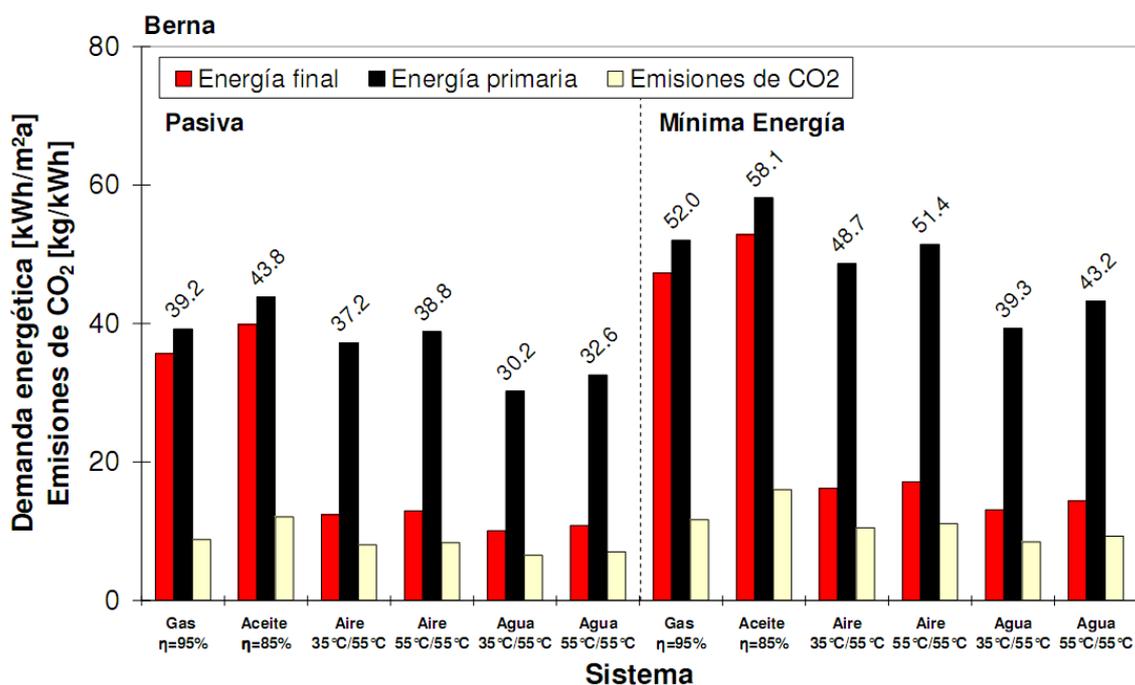


Figura 5.9: Demanda energética y emisiones de CO₂ en diferentes sistemas de producción de energía para sistemas Pasivos y de Mínima Energía en Berna

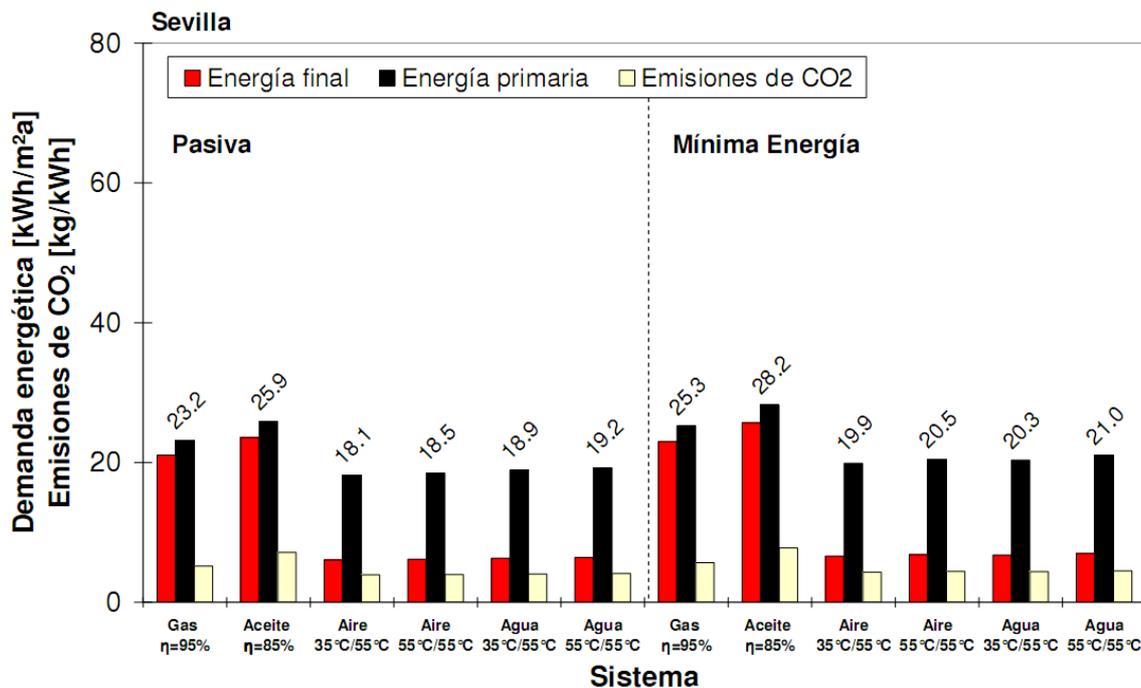


Figura 5.10: Demanda energética y emisiones de CO₂ en diferentes sistemas de producción de energía para sistemas Pasivos y de Mínima Energía en Sevilla

A la vista de las gráficas anteriores parece claro que el uso de una bomba de calor disminuye tanto el consumo de energía primaria, como las emisiones de CO₂. En todos los casos es recomendable el uso de la hasta ahora llamada Instalación 2, pero aún así, el uso de la bomba de calor con convectores es menos contaminante y produce un menor consumo de energía que una instalación convencional de gas o de aceite.

Puede observarse también, que aunque anteriormente en la bomba de calor refrigerada por agua y en la refrigerada por aire en el caso de Estocolmo y Berna los valores de COP resultaban ser superiores en sistemas de mínima energía, el consumo de energía primaria es menor en viviendas pasivas, lo que hace recomendable la implantación de este tipo de edificaciones.

En cuanto a qué sistema es adecuado en cada zona climática, los resultados obtenidos, tanto de COP como de ahorro de energía, apuntan hacia el uso de bomba de calor refrigerada por agua en zonas donde las temperaturas suelen estar por debajo de la temperatura del agua de red mientras que la bomba de calor refrigerada por aire es recomendable en ciudades con temperaturas moderadas y altas a lo largo del año.