

Resumen en castellano

El cambio climático es uno de los principales desafíos que afronta la humanidad y la lucha contra el mismo requiere una transformación radical del sistema energético. Esta transición ha de aunar unas emisiones de gases de efecto invernadero netas nulas con la eficiencia energética y la sostenibilidad. Además, desde una perspectiva europea, la lucha contra el cambio climático tendría el beneficio adicional de lograr la independencia energética y la seguridad de suministro.

La transición ecológica debe afectar a todos los sectores del sistema energético, incluido el sector de la climatización. En Europa, este sector supone un tercio de la demanda final de la energía; dicha demanda aún está cubierta principalmente por combustibles fósiles como el carbón, el petróleo o el gas natural. Para sustituir estas fuentes de energía contaminantes la sociedad tiene a su disposición una amplia gama de opciones. En primer lugar, podría reducirse la demanda final mediante la mejora del aislamiento térmico de los edificios. No obstante, las reducciones de la demanda más allá de cierto punto resultan prohibitivas, por lo que también se hace necesario sustituir las fuentes de calor y frío fósiles por otras con emisiones menores o nulas. Entre las diferentes opciones tecnológicas a las que se podría recurrir, se encuentran las bombas de calor individuales, la biomasa o las redes de calor y frío.

Las redes de calor y frío, también conocidas como sistemas de calefacción urbana o calefacción a distancia, están formadas por una red de tuberías que distribuyen el calor y el frío desde una o varias plantas de producción hasta los consumidores finales, principalmente edificios en los sectores residencial y de servicios. Al igual que otras redes como la eléctrica, las redes de calor se caracterizan por su capacidad para integrar diferentes fuentes de calor y frío a lo largo del tiempo. Además, estos sistemas permiten aprovechar el calor residual proveniente de múltiples fuentes, que de otra forma sería completamente desperdiciado. Otra ventaja de las redes de calor y frío para el sistema energético en su conjunto deriva de su integración con el sistema eléctrico. El almacenamiento térmico en redes resulta mucho más económico que el almacenamiento eléctrico y la conexión de los dos sectores a través de centrales de cogeneración, grandes bombas de calor y calderas eléctricas, permite aprovechar esta ventaja económica. Así, los excedentes de producción renovables pueden

almacenarse en forma de calor, permitiendo de este modo incrementar la penetración de fuentes renovables como la solar o la eólica.

Gracias a estas ventajas, algunos países europeos apostaron por desarrollar su uso y en varios cubren más de la mitad de la demanda de calor en los sectores residencial y servicios. Sin embargo, en el conjunto de la Unión Europea su aportación media es mucho menor, tan sólo del 10%. Dadas las ventajas de las redes de calor y frío mencionadas previamente, su desarrollo en Europa más allá de su expansión actual podría facilitar la transición ecológica del sector de la climatización. Por lo tanto, la estimación de su potencial a nivel europeo tiene una importancia primordial. Tal y como han señalado estudios anteriores, el potencial de las redes de calor y frío depende fundamentalmente de los costes de las redes de tuberías y éstos varían significativamente de un lugar a otro en función de las características locales. Aunque estos costes pueden determinarse fácilmente en barrios o ciudades enteras gracias al uso de modelos hidráulicos y estructurales, su aplicación en zonas más extensas (regiones, países o toda Europa), no resulta viable dado el gran número de cálculos y la gran cantidad de información precisada. Por consiguiente, el desarrollo de modelos sencillos que permitan obtener una estimación de los costes de redes en aplicaciones a gran escala resulta primordial.

Por otra parte, las redes de calor y frío pueden adoptar configuraciones diversas en función de varios parámetros como las temperaturas de impulsión y retorno o la ubicación de las plantas de producción de calor y frío. La combinación de estos y otros parámetros resulta en múltiples tipos de redes, pero que pueden clasificarse en dos grandes categorías: las redes de temperatura elevada y las redes de temperatura ambiente. Por un lado, en las redes de alta temperatura o convencionales, las plantas de producción suministran todo el calor a la temperatura que necesitan los consumidores para la calefacción y la producción de agua caliente sanitaria. Por otro lado, las redes de baja temperatura distribuyen calor a temperaturas próximas a la temperatura ambiente y es necesario que los consumidores dispongan de bombas de calor capaces de elevar la temperatura hasta el nivel requerido. Estudios anteriores han defendido que las redes de temperatura ambiente podrían ser más económicas, ya que las redes podrían construirse con tuberías sin aislamiento iguales a las empleadas en redes de agua potable, las pérdidas de calor serían inapreciables y sería factible aprovechar la misma red para suministrar tanto calor como frío gracias al doble uso de las bombas de calor distribuidas. No obstante, hay muy pocos estudios que hayan comparado cuantitativamente los dos tipos de redes.

Esta tesis ha tenido como objetivo abordar estos dos aspectos de las redes de calor y frío. En primer lugar, se ha investigado su potencial a nivel europeo. Tal y como se ha mencionado previamente, para lograr esta meta hace falta disponer de modelos sencillos que permitan calcular los costes de las redes en áreas extensas. Una de las herramientas desarrolladas con este fin es el modelo de Persson y Werner, que ofrece una primera aproximación a estos costes. Este modelo cuenta con varios parámetros entre los que se encuentra la *anchura efectiva*, *effective width* en inglés, que proporciona la longitud de zanja necesaria en una zona

en la que se vaya a implantar una red. Desgraciadamente, estudios previos no habían logrado identificar los valores de la *anchura efectiva* en todos los tipos de zonas urbanas. Además, tampoco se había prestado suficiente atención a la longitud necesaria de las acometidas a cada edificio, ya que toda la atención se había centrado en la red de distribución.

En esta tesis se ha efectuado un análisis geográfico detallado de dos de las redes de calor más extensas de Dinamarca, gracias al cual se han podido obtener nuevas ecuaciones para la *anchura efectiva*. En dichas ecuaciones se relaciona la *anchura efectiva* con varios indicadores de densidad urbana como el número de edificios y la superficie construida. Posteriormente se ha aplicado el modelo de Persson & Werner, con las nuevas ecuaciones, a varias zonas con el fin de validarlo y se ha podido determinar que el modelo proporciona estimaciones relativamente precisas cuando se emplea a nivel agregado y en zonas de elevada extensión, pero que su precisión deja que desear cuando se utiliza en zonas pequeñas.

Al modelo se le añadieron posteriormente dos mejoras con el fin de tener en cuenta el hecho de que probablemente no todos los edificios se conecten a la red y que las demandas de calor disminuirán indudablemente en el futuro. Una vez mejorado, se aplicó el modelo de Persson y Werner a todos los países de la Unión Europea (UE-27), con el objeto de estimar los costes de las redes de calor y así su potencial. Uno de los hallazgos de este estudio es que estos sistemas podrían proveer un tercio de la demanda europea de calor en los sectores residencial y de servicios para 2050.

En segundo lugar, este trabajo ha examinado los costes económicos de las redes de temperatura elevada y ambiente, tanto para el suministro único de calor, como para el suministro conjunto de calor y frío. Este examen se ha llevado a cabo por medio de un estudio detallado de la ciudad de Bilbao, en el que se han tenido en cuenta todos los elementos que conforman un sistema de climatización urbana: producción de calor y frío, transporte y conexiones con los consumidores finales. Los resultados de esta investigación muestran que, para el suministro exclusivo de calor, las redes de temperatura elevada serían más económicas que las redes de temperatura ambiente gracias a la simultaneidad de consumos (no todos los consumidores demandan calor al mismo tiempo, por lo que la central de producción tan solo tiene que proveer el consumo agregado), la posibilidad de combinar múltiples fuentes de energía, la economía del almacenamiento térmico a gran escala y los menores precios de la electricidad para consumidores industriales. Estos costes totales más bajos se producen incluso a pesar de los mayores costes de la red de transporte. Además, estos hallazgos son sólidos ante una serie de cambios en las condiciones económicas entre las que se encuentran la subida drástica de precios del gas natural a raíz de la guerra de Ucrania o unos tipos de interés elevados. Sin embargo, cuando las redes han de suministrar los dos tipos de servicios, frío y calor, los costes son muy similares. Mientras que en la red de temperatura elevada es preciso construir una red de frío paralela a la de calor, en la red de temperatura ambiente no es necesario realizar ninguna inversión y los costes de operación adicionales son muy reducidos.

Finalmente, el estudio centrado en Bilbao también evaluó la competitividad de las redes de calor con otras fuentes bajas en carbono como las bombas de calor individuales y la principal fuente de calor en la actualidad, el gas natural. Esta comparación indica que, si bien los dos tipos de redes de calor serían más económicos que las bombas de calor individuales, no lograrían desbancar al gas natural, dado que la imposición sobre el mismo es prácticamente nula, lo que no permite que los consumidores tengan en cuenta el coste social de las emisiones de carbono.