

# CIRCULAR THERMAL<sup>SM</sup>

CÓMO DEVOLVER EL CALOR  
DESPERDICIADO A LOS PROCESOS  
INDUSTRIALES Y MÁS ALLÁ



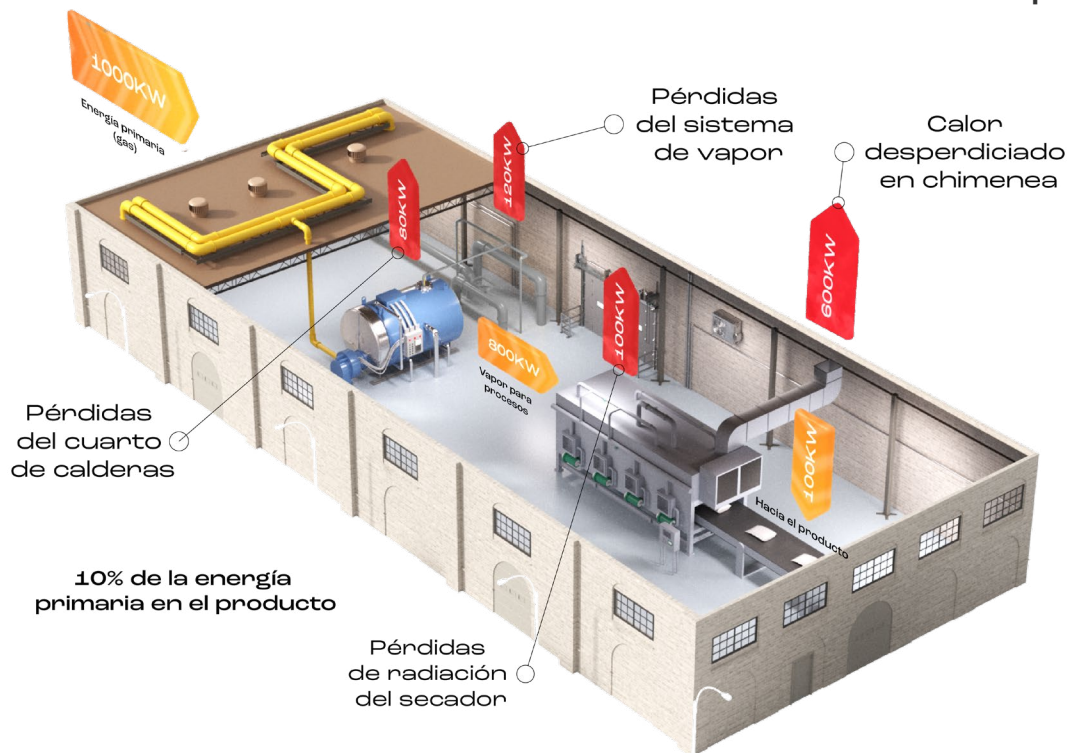
**Armstrong<sup>®</sup>**  
EXPERIENCE MATTERS<sup>™</sup>

## ¿ADÓNDE VA A PARAR LA ENERGÍA?

En términos simples, la primera ley de la termodinámica nos dice que la energía no se crea ni se destruye: su proporción dentro de un sistema permanece estable. Cuando empleamos la energía, en ocasiones, convirtiéndola de una forma a otra, se degrada a una energía de calidad inferior. Entonces, si la energía en una planta industrial se degrada pero no se destruye, ¿cómo sale de la planta?

En la actualidad, la energía primaria se introduce en una planta en forma de electricidad y combustibles fósiles, que con más frecuencia se reemplazan con energías renovables. Estas fuentes son medibles, así que conocemos la cantidad de energía primaria entrante. En una fábrica típica, menos del 20 % de la energía entrante se utiliza para mover cosas (los motores convierten la electricidad en energía mecánica) o para iluminar las instalaciones. Debido a la eficiencia energética, parte de esta energía termina convirtiéndose en calor desperdiciado que aumenta la temperatura del aire interior del edificio. ¿Esto significa que el 80 % restante de la energía primaria utilizada en la industria térmica se destina a los productos fabricados? En la mayoría de las industrias, solo una pequeña parte de la energía primaria se convierte en energía química contenida en el producto final. Además, los insumos utilizados en la fabricación suelen estar a la misma temperatura (a menudo ambiente) que los productos terminados cuando salen de la planta. De hecho, la mayor parte de la energía primaria termina convertida en calor desperdiciado que, con frecuencia, se sigue perdiendo a través de chimeneas, torres de refrigeración y aguas residuales.

### Sistema térmico unidireccional estándar: usuario de un solo proceso



## CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO EN LA INDUSTRIA

La secuencia de calentamiento y enfriamiento es la base de los procesos industriales. Las plantas están diseñadas para facilitar el flujo de productos, y el calentamiento y enfriamiento en distintas fases del proceso suelen compensarse mutuamente desde un punto de vista energético.

### ENFRIAMIENTO

El enfriamiento se logra cuando se elimina el calor de un fluido. Una vez extraída, esa energía generalmente se desperdicia a través de torres de refrigeración que liberan calor y vapor de agua a la atmósfera. La cantidad de energía extraída como parte del proceso de enfriamiento puede representar hasta 1/3 de las necesidades de calentamiento de una planta, o incluso más.

El compresor de aire es un buen ejemplo: hasta el 90 % del consumo eléctrico de un compresor de aire se convierte en calor desperdiciado durante el enfriamiento del compresor. Dependiendo de la humedad del aire, su condensación agregará calor desperdiciado equivalente a entre el 5 % y el 20 % del consumo eléctrico del compresor. La suma de ambos puede representar a veces más del 100 % de la electricidad consumida por el compresor.

El mayor potencial de calor desperdiciado que viene del enfriamiento se encuentra en las fábricas que utilizan procesos de ultracongelación para producir helados, alimentos congelados y otros productos que, al salir de la planta, se encuentran más fríos que las materias primas que ingresan. Al extraer calor del producto, generan un importante exceso de calor desperdiciado que viene del enfriamiento. Esta energía puede satisfacer no solo sus propias necesidades de calentamiento, sino también una parte de la demanda térmica de sus vecinos.

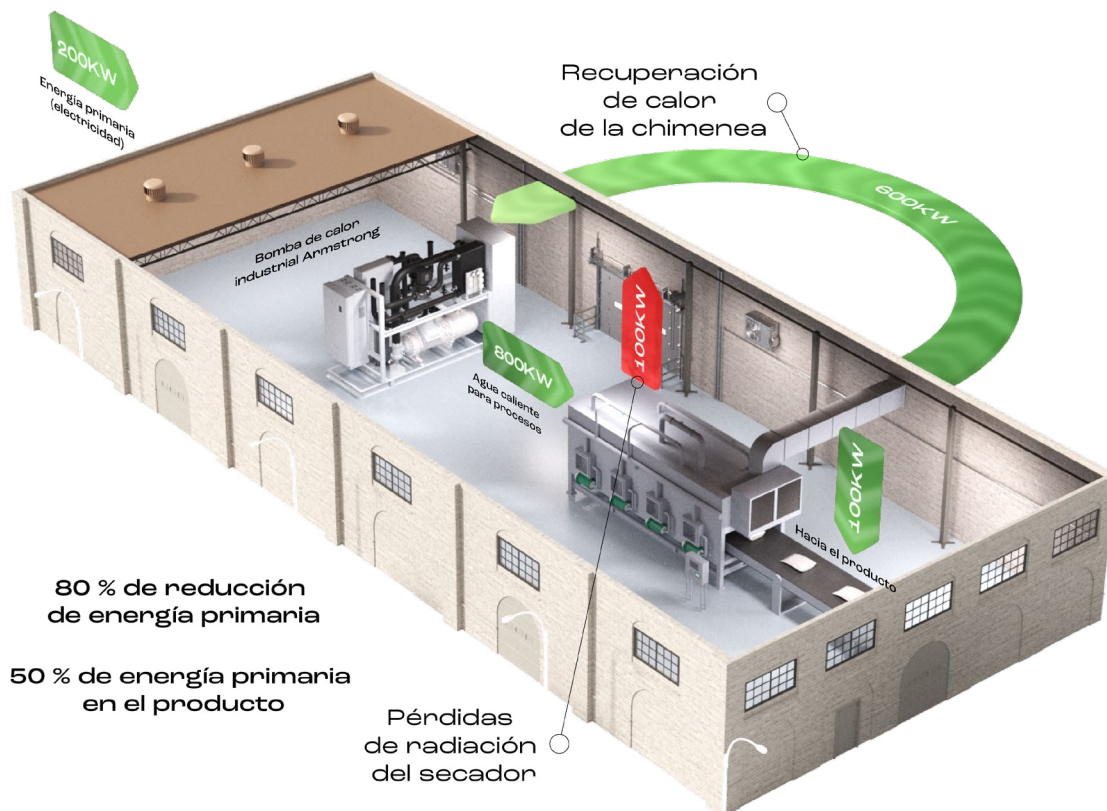
## CALENTAMIENTO

Se pierde energía en la atmósfera durante el calentamiento debido a ineficiencias en la generación y distribución de los servicios públicos. La eficiencia de un sistema de vapor típico generalmente oscila entre no más del 60 % y un máximo del 80 %. La energía restante se utiliza para tareas importantes, como el secado de productos a través de la evaporación del agua, el calentamiento de productos para desencadenar una reacción química, el calentamiento/humidificación/deshumidificación del aire, el calentamiento del agua para la limpieza, etc. Pero, ¿qué sucede con la energía después de eso? En un secador, que es una de las aplicaciones de calentamiento más grandes de la industria, hasta el 80 % de la energía se libera a la atmósfera en forma de aire muy húmedo a baja temperatura (<175 °F/<80 °C) a través de chimeneas. Esto también ocurre en la mayoría de las aplicaciones industriales y, en ciertos casos, como las columnas de destilación y los evaporadores, a menudo se debe enfriar el resultado del proceso.

## ADOPTAR UN ENFOQUE CIRCULAR

Si bien la calidad de la energía contenida en el calor desperdiciado se degrada, la cantidad de energía sigue siendo muy significativa. Según nuestros estudios, del 50 % al 80 % de la energía primaria utilizada en las industrias ligeras sale de la planta como calor desperdiciado a temperaturas medias (<400 °F/<200 °C) o incluso a bajas temperaturas (<200 °F/<90 °C). Esto significa que entre el 50 % y el 80 % de la misma puede reutilizarse y, por lo tanto, podrían evitarse las respectivas emisiones de Alcance 1. Al aplicar un enfoque circular a la energía térmica industrial, podemos recuperar dicha energía y volver a utilizarla para trabajar durante el proceso.

### Sistema Circular Thermal<sup>SM</sup>: usuario de un solo proceso



Durante más de 40 años, la industria pesada ha utilizado la Integración de Procesos (PI, por sus siglas en inglés), o Pinch, para maximizar la eficiencia térmica de las plantas, principalmente mediante la recuperación directa de calor. Este método consiste en identificar y superponer los flujos fríos y calientes de una planta para calcular la máxima recuperación teórica de calor y los requisitos mínimos de energía de la planta. El resultado es un diseño ideal que se puede adaptar a las realidades prácticas del sitio con base en elecciones bien fundamentadas. En las industrias ligeras, se necesitará una “red de intercambiadores de calor” adicional para recuperar el calor de baja calidad de las fuentes, almacenarlo, mejorarlo si es necesario y trasladarlo a los disipadores térmicos. A través de esta metodología, las plantas industriales pueden recuperar el calor desperdiciado y reducir significativamente su consumo de energía primaria y emisiones de CO<sub>2</sub>. A este proceso lo denominamos la metodología Circular Thermal<sup>SM</sup>.

## CIRCULAR THERMAL<sup>SM</sup> ESTÁ EN EL CENTRO DE LA METODOLOGÍA DE DESCARBONIZACIÓN DE ARMSTRONG

La metodología de Armstrong para la descarbonización térmica incluye tres pasos: optimizar la eficiencia del sistema térmico, minimizar la demanda de energía del proceso y descarbonizar las principales fuentes de la instalación. Como parte de la optimización del sistema, la metodología Circular Thermal<sup>SM</sup> permite generar el mayor impacto con un retorno de inversión positivo.

### **Paso uno: optimizar la eficiencia del sistema térmico mediante la recuperación del calor desperdiciado**

Aunque la teoría subyacente de la metodología Circular Thermal<sup>SM</sup> ha sido reconocida desde hace tiempo, a menudo se ignoraba en la construcción de plantas industriales nuevas debido a motivos económicos. En el pasado, los combustibles fósiles se consideraban baratos y abundantes, y pocas personas se preocupaban por las emisiones de CO<sub>2</sub>, por lo que resultaba fácil y práctico diseñar y operar sistemas térmicos unidireccionales. Sin embargo, esto ya no es así. En el mundo actual, la energía constituye un riesgo geopolítico y empresarial, los combustibles fósiles son cada vez más caros y a veces no están disponibles, la electricidad renovable es cada vez más barata, las emisiones de CO<sub>2</sub> suponen un gasto, mientras el retorno de la inversión de la metodología Circular Thermal<sup>SM</sup> mejora considerablemente. Cuando los combustibles fósiles desaparezcan, la recuperación de calor desperdiciado será la forma más económica de descarbonizar los sistemas térmicos.

#### **Eliminación de vapor**

Los sistemas de vapor normalmente generan y distribuyen calor a 365 °F/185 °C (equivalente a 150 psig/10 barg de vapor saturado), incluso cuando el proceso requiere una temperatura de calentamiento mucho más baja. Recuperar el calor desperdiciado para generar vapor a baja presión, que luego podrá comprimirse a una mayor presión, es técnicamente posible. Sin embargo, si el objetivo final es calentar un producto a una temperatura mucho más baja, se producirá un consumo de energía excesivo, en parte debido a las pérdidas mínimas del 20 % inherentes a los sistemas de vapor.

Por esto, consideramos que el agua caliente es el mejor fluido de calentamiento hasta una temperatura de 250 °F/120 °C. La eliminación del vapor consiste en reemplazar los sistemas de vapor por otros de agua caliente o glicol para una recuperación optimizada del calor desperdiciado. Al permitir un equilibrio más cercano entre la generación de calor y el uso de calor dentro del proceso, la eliminación del vapor optimiza la eficiencia del sistema. Armstrong International tiene más de un siglo de vasta experiencia en sistemas de vapor, y recomienda la eliminación del vapor para el calentamiento de baja calidad.

En teoría, el uso del agua caliente requiere mayores superficies de intercambio de calor, ya que el calor sensible contiene entre 4 y 5 veces menos energía que el calor latente. Sin embargo, en la práctica, los intercambiadores de calor de vapor existentes suelen estar sobredimensionados, por lo que a menudo bastará con duplicar la superficie de intercambio de calor. La eliminación de vapor también elimina los problemas de drenaje de condensado inherentes a las aplicaciones que usan vapor para calentar a menos de 212 °F/100 °C, lo que puede crear un vacío en los intercambiadores de calor.

Por último, para evitar longitudes excesivas en las tuberías de agua más grandes, las fuentes de calor deberían estar conectadas a los disipadores cercanos. Este diseño de sistema descentralizado es inherente a los sistemas de la metodología Circular Thermal<sup>SM</sup>, a diferencia del enfoque tradicional de “salas de calderas centrales de vapor y red de distribución”.

## Bombas de calor

El calor desperdiciado de alta calidad a menudo se puede recuperar utilizando solamente un intercambiador de calor, aunque esto a veces puede suponer un desafío técnico debido a la contaminación del aire de procesos descargado a través de las chimeneas. Sin embargo, el calor desperdiciado suele estar disponible a temperaturas inferiores a las que exige el proceso, por lo que es necesario convertir el calor de baja calidad en calor de calidad media. Esto requiere energía adicional de alta calidad (electricidad) para poner en funcionamiento los compresores de la bomba de calor que aumentan las temperaturas del calor desperdiciado hasta los niveles requeridos.

La tecnología utilizada en las bombas de calor existe desde hace 170 años. Se trata de la misma tecnología que pone en funcionamiento los refrigeradores en nuestros hogares y el aire acondicionado en nuestras oficinas. La eficiencia es la ventaja más significativa que ofrecen las bombas de calor. La electricidad requerida para poner en funcionamiento una bomba de calor normalmente representa solo entre 1/4 y 1/3 de la producción total de calor, y casi toda esa electricidad se termina convirtiendo en calor útil. Sin embargo, la mayor parte de la energía producida proviene del calor desperdiciado de baja calidad que se ha recuperado. Las bombas de calor suelen considerarse una tecnología de electrificación térmica, pero en las aplicaciones industriales se consideran principalmente una tecnología de mejora del calor desperdiciado.

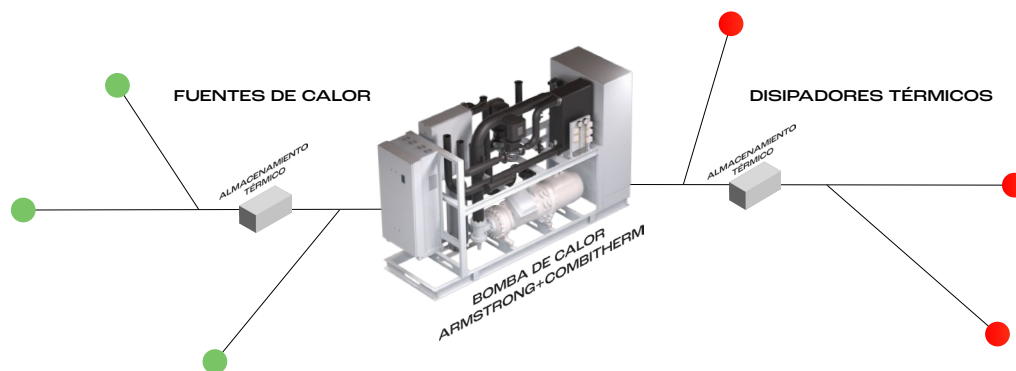
Las bombas de calor de circuito cerrado ahora están disponibles para capacidades medias (entre 1,7 y 7 millones de BTU por hora por unidad/0,5 MW a 2 MW por unidad). Estas bombas de calor utilizan una nueva generación de fluidos de trabajo que son más seguros para los usuarios, más confiables (debido a una presión relativamente baja en el circuito) y tienen un impacto ambiental limitado (GWP <10 y degradación de TFA <2 %). Estas pueden generar temperaturas de un rango medio, recuperando el calor desperdiciado de baja calidad a menos de 176 °F/80 °C (como efecto secundario, a veces se produce un enfriamiento útil) y mejorar ese calor a 250 °F/120 °C, lo que permite la generación de vapor a baja presión, si es necesario.

Este vapor se puede usar para inyección directa, o se puede aumentar su presión y temperatura utilizando un compresor de vapor como parte del sistema de recompresión mecánica del vapor (MVR, por sus siglas en inglés). Estos compresores requieren alrededor de un 10 % de inyección de agua. El vapor adicional compensa las pérdidas de radiación y las fugas en el sistema de vapor aguas abajo. Al recuperar el condensado y el vapor flash existente más allá de los intercambiadores de calor y devolverlos como insumos para la bomba de calor de alta temperatura, el circuito se puede cerrar y equilibrar.

## Almacenamiento

El calor desperdiciado no siempre está disponible cuando y donde se necesita. Una vez recuperado, debe reubicarse y almacenarse, generalmente en forma de agua caliente o utilizando materiales sólidos, hasta que pueda usarse en el proceso. Aunque el espacio puede suponer un problema en determinadas configuraciones de planta, existen tecnologías confiables para superarlo.

### Sistema Circular Thermal<sup>SM</sup>: usuario de múltiples procesos



Gracias a la metodología Circular Thermal<sup>SM</sup>, a medida que el calor fluye en múltiples direcciones por las plantas, se crea un sistema térmico más dinámico. El calor recuperado se almacena y se pasa de temperaturas más bajas a temperaturas más altas siempre que resulte más práctico o cuando la electricidad de la red sea más barata, contribuyendo así a la administración de la demanda. Estos sistemas son más automatizados y utilizan datos en tiempo real para decidir en qué momento trasladar o almacenar el calor. Además, están disponibles como servicio, lo que reduce la necesidad de capital, permite la tercerización de los riesgos y aporta la flexibilidad de activos necesaria para adaptarse a un mundo que cambia rápidamente.

## **Paso dos: minimizar la demanda energética del proceso**

La relación entre la electricidad y la producción de calor útil de una bomba de calor se denomina Coeficiente de desempeño (COP, por sus siglas en inglés) y depende del aumento de temperatura. Optimizar el COP es la razón principal para equilibrar al máximo las temperaturas de la fuente de calor y del disipador. Si una bomba de calor realiza un trabajo útil al enfriar la fuente y calentar el disipador (por ejemplo, en un proceso de destilación) sin necesidad de consumir más electricidad para ello, tendrá un COP combinado (CCOP, por sus siglas en inglés) mucho mayor.

El diseño de muchos procesos se basó en temperaturas de servicio más altas que son relativamente fáciles de obtener con vapor. Sin embargo, el análisis de la temperatura real del vapor en el intercambiador de calor (posterior a la reducción en la presión producida por una válvula de control) o la identificación de los requisitos exactos de temperatura del proceso revelan a menudo que la temperatura requerida para el disipador de calor es muy inferior a la esperada. En consecuencia, se mejora el COP sin afectar las condiciones del proceso de la planta ni la calidad del producto.

Las bombas de calor que producen temperaturas más bajas requieren menos electricidad, así que el COP será mayor. La consecuente disminución permanente de los costos relacionados con los gastos operativos merece la pena, incluso en casos en los que se requieran inversiones adicionales (principalmente para la eliminación del vapor). A largo plazo, los gastos operativos pueden reducirse aún más remplazando los equipos de proceso antiguos o cercanos al fin de la vida útil por equipos modernos que ofrezcan una mayor eficiencia energética o requieran temperaturas de calentamiento más bajas.

En algunos casos, el mismo trabajo útil se puede realizar sin usar calor en absoluto. Por ejemplo, el vapor se ha utilizado para humidificar el aire en el sector salud o en industrias como la farmacéutica, mientras que un aumento similar en la humedad del aire es posible gracias a los humidificadores adiabáticos o eléctricos. Estos humidificadores no consumen menos energía para evaporar el agua a presión atmosférica, pero sí permiten la eliminación de vapor de las unidades manejadoras de aire (AHU, por sus siglas en inglés). Esto elimina la necesidad de generar vapor a temperatura media utilizando bombas de calor y la consiguiente reducción en el COP, así como la necesidad de distribuirlo posteriormente, con las pérdidas inherentes al sistema de vapor.

## **Paso tres: descarbonizar las principales fuentes de energía de sus instalaciones**

La energía primaria requerida para el funcionamiento de la metodología Circular Thermal<sup>SM</sup> es la electricidad, que puede descarbonizarse utilizando energía renovable. El resto del trabajo de descarbonización térmica puede lograrse mediante el cambio a energías renovables, como el biogás, la biomasa, la energía solar térmica, el hidrógeno o la electrificación directa. Esta es la fase final de la metodología de descarbonización térmica en tres pasos de Armstrong.

Sin embargo, es fundamental que la descarbonización se implemente solo después de que se haya agotado el potencial de optimización y minimización. El cambio a energías renovables de los sistemas térmicos unidireccionales, que liberan a la atmósfera entre el 50 % y el 80 % de la energía primaria en forma de calor desperdiciado, constituye un error. Conduce a un despilfarro significativo de la escasa energía renovable que es esencial para descarbonizar aplicaciones difíciles de eliminar en sectores como la industria pesada, el transporte o la construcción.

## **LAS VENTAJAS DE LA METODOLOGÍA CIRCULAR THERMAL<sup>SM</sup> SON SIGNIFICATIVAS**

Un gran porcentaje de la energía térmica utilizada actualmente en la industria puede recuperarse aplicando la metodología Circular Thermal<sup>SM</sup>. Además, esta metodología no debería limitarse a la extensión de una única fábrica. Si bien un creciente número de áreas industriales está aplicando un enfoque circular a la generación de materiales y energía, el intercambio y la mejora del calor desperdiciado entre plantas industriales vecinas, electrolizadores de hidrógeno, centros de datos, áreas de oficinas y ciudades sigue siendo inusual. El desarrollo de contenedores de almacenamiento térmico transportables de material sólido está ampliando las oportunidades para el transporte físico del calor desperdiciado en distancias medias (preferiblemente utilizando transporte descarbonizado). Las plantas industriales pesadas que tienen un exceso de calor desperdiciado de alta calidad pueden compartirlo con plantas industriales ligeras o con un distrito de calefacción ubicado a decenas de millas/kilómetros de distancia.

## El potencial de calentamiento y enfriamiento en edificios

La recuperación y reutilización del calor desperdiciado también se puede contemplar para el calentamiento y enfriamiento de edificios. Sin embargo, utilizar la metodología Circular Thermal<sup>SM</sup> presenta más desafíos en los edificios que en la industria debido a una diferencia significativa: la frecuencia. Las aplicaciones industriales requieren un calentamiento y enfriamiento periódicos, al menos semanalmente, lo que limita los requisitos de tamaño respecto al almacenamiento térmico. Circular Thermal<sup>SM</sup> para el calentamiento y enfriamiento de edificios requeriría un almacenamiento térmico por temporada que mantuviera el calor aproximadamente a la misma temperatura durante seis meses. Si algún día se llega a comercializar el almacenamiento térmico por temporada de pequeño volumen a precios asequibles, aumentará considerablemente el COP promedio anual de las bombas de calor utilizadas para el calentamiento y enfriamiento de edificios, reduciendo así en gran medida su consumo eléctrico primario anual.

El enfriamiento de edificios ya se puede utilizar como fuente de calor para las industrias cercanas, que necesitan calor todo el año. Dichos sistemas de “distritos de enfriamiento” podrían tener sentido principalmente en climas más cálidos, donde se necesita contar con enfriamiento la mayor parte del año. En climas más fríos, una fuente de calor más valiosa de los edificios podría ser el sistema de alcantarillado, que recolecta agua sanitaria calentada “de un solo paso” proveniente de duchas y grifos.

Otra fuente para construir bombas de calor es la energía geotérmica, ya sea superficial o de lagos y ríos. La energía geotérmica ofrece una temperatura más alta que se mantiene relativamente estable durante todo el año en comparación con el aire del ambiente. Durante el verano, esta fuente suele estar lo suficientemente fría como para evitar utilizar el compresor de la bomba de calor, lo que permite que funcione en modo de “enfriamiento libre”.

## CIRCULAR THERMAL<sup>SM</sup> FACILITA LA DESCARBONIZACIÓN TÉRMICA

El calentamiento y enfriamiento en la industria y los edificios representan aproximadamente el 70 % del consumo total de energía actualmente en el mundo. Al recuperar, mejorar y reutilizar el calor que se desperdicia en las plantas industriales, podremos facilitar considerablemente la descarbonización térmica y reducir la cantidad de energía renovable requerida para poner en funcionamiento estas plantas en el futuro. En todo el mundo ya se está llevando a cabo la transformación de las instalaciones existentes, y cada vez se diseñan más sistemas nuevos utilizando la metodología de Circular Thermal<sup>SM</sup>.

La aplicación de este concepto más allá de los límites de una sola planta, y en los edificios, disminuirá la necesidad de energía primaria y ayudará en la descarbonización de los sistemas energéticos mundiales aún más.



INTELLIGENT THERMAL UTILITIES SOLUTIONS FROM A GLOBAL  
LEADER IN ENERGY MANAGEMENT AND ENJOYABLE EXPERIENCES

**Armstrong International**

The Americas | Asia | Europe, Middle East, Africa

[armstronginternational.com](https://www.armstronginternational.com)