

# ESTUDIO DE CASOS: OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE CALOR

*Fecha de aceptación: 02/09/2024*

### **Marcelo Castelli**

Doctor en Ingeniería Industrial por la Universidad de Navarra, Ingeniero Industrial por la Universidad de Montevideo. Marcelo es director de MCT Ingeniería Ltda, empresa líder en proyectos de eficiencia y ahorro de energía en Uruguay, y a su vez se desempeña como coordinador de proyectos de investigación y desarrollo en la Universidad de Montevideo

### **Martín Garmendía**

Ingeniero Industrial por la Universidad de la República. Es director fundador de MCT Ingeniería Ltda, empresa líder en proyectos de eficiencia y ahorro de energía en Uruguay. Ha sido docente universitario de las disciplinas Energía y Proyecto Final de Carrera en la Universidad de Montevideo

### **Manuel Curiel**

Master of Science por Northeastern University, Boston, USA e Ingeniero Industrial por la Universidad de Montevideo. Es ingeniero en MCT Ingeniería Ltda, empresa líder en proyectos de eficiencia y ahorro de energía en Uruguay

**RESUMEN:** El presente artículo presenta distintos casos prácticos de aprovechamiento de calores residuales de proceso. Se describe la metodología práctica de definición de oportunidades de ahorro, la generación de líneas de base e indicadores de desempeño que permitan evaluar el nivel de ahorro en el tiempo. Se presentan dos ejemplos prácticos en distintos sectores. En cada caso se presenta la metodología de trabajo, la definición de la línea de base de consumo, los indicadores de desempeño desarrollados y su seguimiento, así como también la forma de cálculo de los ahorros. Finalmente, se presentan los ahorros obtenidos, los niveles de inversión realizados y los períodos de repago.

**PALABRAS CLAVE:** recuperación de calor, calor residual, eficiencia energética, servicios energéticos.

## **INTRODUCCIÓN**

Existen diversos factores que definen la ejecución de proyectos dentro de las organizaciones. Desde una metodología elaborada y clara de detección de puntos de mejora, hasta ideas erráticas provenientes de los más distintos ámbitos. Esto sucede tanto en las pequeñas

organizaciones como en las más grandes estructuras. Los proyectos de ahorro y eficiencia energética en general, y el aprovechamiento de calor residual de procesos en particular, no es ajeno a estos enfoques tan dispares. Sin prejuicio de lo que suceda en otros ámbitos, en estos casos si es necesaria la correcta aplicación de una metodología para el abordaje de la problemática planteada, con el fin de viabilizar y llevar a la práctica de forma eficiente lo proyectado, con el fin de lograr de forma sostenida los ahorros proyectados.

En este artículo se presenta una metodología de abordaje de estos proyectos, apoyada en ejemplos prácticos, con el fin de describir de forma clara el proceso de ejecución de estos proyectos, las distintas barreras que existen a la hora de ponerlos en práctica y la forma de medir los resultados de los mismos.

Para esto se utilizarán dos ejemplos de proyectos exitosamente ejecutados, por un lado la implementación de una bomba de calor en un aeropuerto, extrayendo calor del área de free shop del aeropuerto y volcándolo al circuito de agua caliente para acondicionamiento de las distintas áreas del local en media estación e invierno, y por otro lado, el aprovechamiento de energía residual en una industria frigorífica, proveniente del calor vertido a la atmósfera a través del ciclo de refrigeración. Si bien son dos ejemplos de ámbitos muy distintos, la metodología de abordaje es similar.

## **METODOLOGÍA DE TRABAJO**

### **Identificación de proyectos de mejora**

Como se mencionó anteriormente, la identificación de los proyectos de mejora puede tener distintos orígenes, desde un enfoque energético, una de las formas de abordar el problema es a partir de la realización de una auditoría inicial, la cual puede ser global de la planta o instalación a estudio o bien particular para un sistema o conjunto de sistemas aislados.

En los casos que se recogen en el presente artículo, se realiza para el caso de la industria frigorífica un abordaje del sistema de generación de vapor y frío del proceso productivo y en el caso de la instalación del aeropuerto, se estudian en particular los sistemas de frío/calor del edificio.

En cualquier caso, con el fin de generar una línea de base de consumos confiable, es necesario contar con datos precisos respecto a consumos de energía y variables dependientes que afecten a esos consumos.

Este punto suele ser el más complejo de abordar, debido a que se requiere información confiable y de calidad adecuada para definir las líneas de base que permitirán determinar qué proyectos pueden llevarse adelante y cuales se deben descartar.

En los casos de aprovechamiento calores residuales, se deben tener en cuenta los siguientes factores:

1. Necesidades térmicas de las instalaciones/procesos: esto refiere a qué tipo de calor requiere el proceso, por ejemplo, si necesitamos acondicionar un ambiente en invierno se debe tener en cuenta a qué temperatura se debe acondicionar y qué volumen de aire. Generalmente, si es necesario acondicionar aire a 20-24C, se podrá utilizar agua caliente a 50-55C. Sin embargo, si deseamos utilizar aire caliente para el secado de algún producto a, por ejemplo, 130-140C, seguramente necesitemos generar vapor a 8-10barg con el fin de obtener esas temperaturas de aire de proceso.
2. Fuentes de calor residual: por otro lado, debemos evaluar si es posible utilizar parte de los calores residuales del proceso como fuentes de calor para los sistemas de ahorro. De ser posible esta utilización, se incrementará notoriamente el rendimiento respecto a utilizar únicamente un equipo de mayor eficiencia que el existente. A su vez, se debe estudiar la simultaneidad del calor residual con la necesidad de calor, y, por último, se deben tener en cuenta las ubicaciones de las fuentes de calor y los lugares de uso.

Luego de conocer los consumos de energía de las instalaciones, identificadas las necesidades térmicas de los procesos/instalaciones y las fuentes de calor residuales que podamos utilizar, es posible definir los posibles proyectos de ahorro.

### **Planteo y priorización de proyectos de mejora.**

A la hora de plantear y priorizar los proyectos de mejora, es aconsejable tener en cuenta ciertos puntos:

1. Nivel de ahorro generado por el proyecto.
2. Dificultad de implementación del proyecto.
3. Capacidad de medición de parámetros para cálculo del ahorro generado.
4. Nivel de inversión/financiamiento requerido para la ejecución del proyecto.

La priorización de uno de estos puntos respecto a los otros dependerá de múltiples factores, por lo cual sería incorrecto anteponer uno a otro.

### **Implementación de proyectos y cálculo de ahorros.**

A la hora de implementar los proyectos y posteriormente cuando se deben calcular los ahorros devenidos de las instalaciones realizadas, es deseable (aunque no siempre técnica o económicamente viable), tener en cuenta los siguientes puntos:

1. Capacidad y facilidad de retorno a la situación previa.

Es bueno contar con la capacidad de retorno del sistema a la situación previa a la implementación del proyecto de ahorro, con el fin de no entorpecer la operativa normal de la instalación por un lado (ante cualquier posible fallo en operación), y no generar rechazo al nuevo sistema por posibles fallas de ajuste en el startup por otro.

## 2. Equipos de respaldo.

También es deseable que existan equipos de respaldo dentro de la nueva instalación, siempre y cuando los períodos de repago no se disparen, que permitan operar de forma eficiente la nueva instalación propuesta.

## 3. Cálculo de ahorros

De ser posible, y el proyecto lo amerite, es deseable la utilización de un protocolo de medida y verificación para la definición de la línea de base y el cálculo de los ahorros, validado por los distintos involucrados en el proyecto.

## EJEMPLOS DE PROYECTOS IMPLEMENTADOS

### Incorporación de bomba de calor en aeropuerto

Existen instalaciones, las cuales cuentan con necesidades de calor y frío durante todo el año. En estos casos, es una buena práctica, siempre y cuando los niveles de temperatura requeridos lo permitan, la utilización de un equipo tipo bomba de calor, que sea capaz de suministrar el calor (total o parcialmente) y el frío (también total o parcialmente) a la instalación.

El siguiente esquema resume el funcionamiento del sistema en las distintas estaciones, previo a la incorporación de la medida de ahorro;

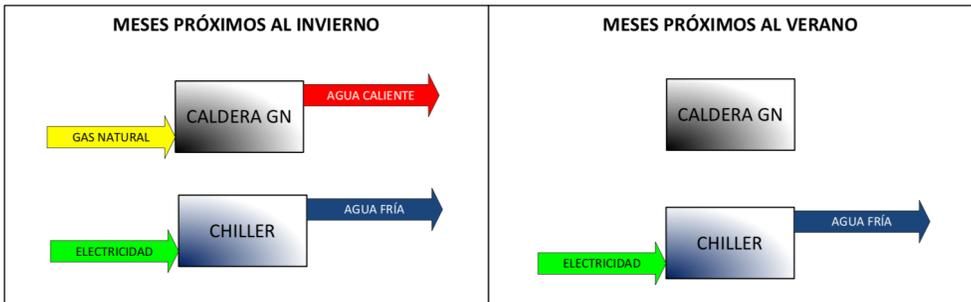


Figura 1. Operación del sistema previo a la ejecución del proyecto.

Para la generación de agua caliente, se utiliza una caldera a gas natural, con las siguientes características:

Potencia térmica: 1.165kW

Eficiencia máxima: 92%

Los consumos de gas natural de dos años se presentan a continuación:

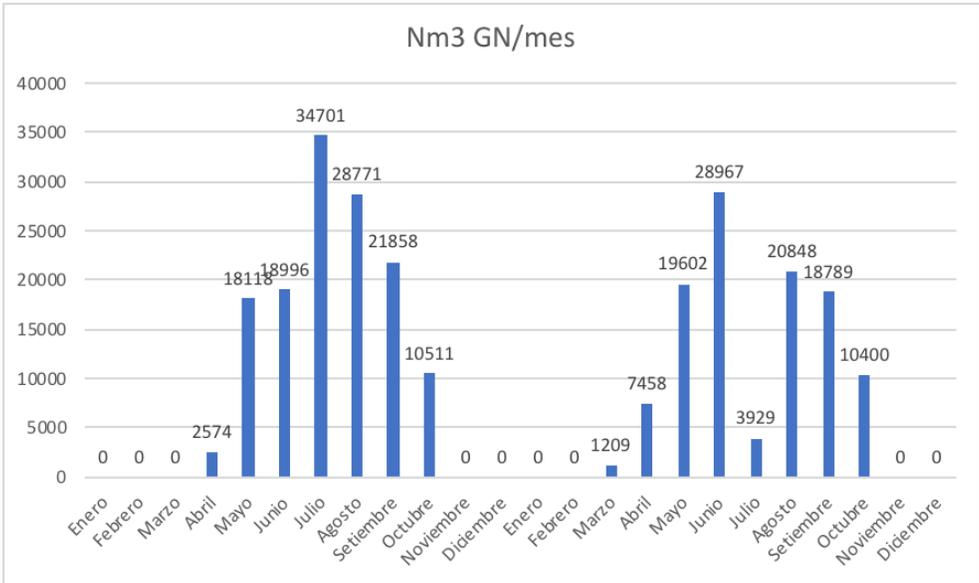


Figura 2. Consumos de gas natural para dos años consecutivos.

Para la generación de agua fría, se cuenta con dos chiller de 750TR de capacidad cada uno.

Con los datos recabados, teniendo en cuenta los costos de gas natural y la eficiencia de generación de agua caliente, se dimensiona el nuevo sistema priorizando la sustitución del sistema de generación de agua caliente.

Por lo tanto, el nuevo esquema de operación es el siguiente:



Figura 3. Esquema de operación luego de la ejecución del proyecto.

De acuerdo a la instalación relevada, las características de los equipos a instalar, de acuerdo a los datos obtenidos del software del fabricante, son las siguientes:

- Cantidad de unidades : 2
- Compresores : 5 reciprocantes / unidad
- Refrigerante : R134a
- Consumo : 133 kW / unidad
- Capacidad de calor : 361 kW / unidad
- Capacidad de frío : 228 kW / unidad

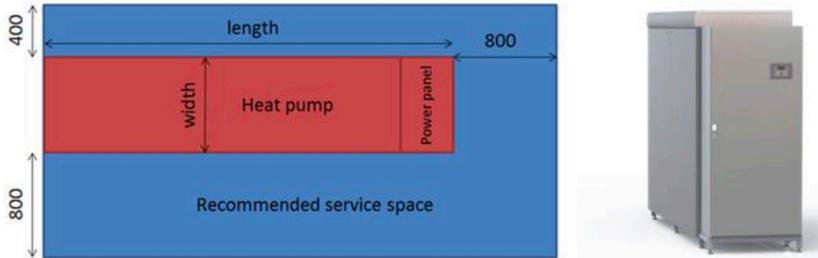


Figura 4. Especificaciones de los equipos a instalar.

En este caso, es de vital importancia tener presente la simultaneidad de operación de los sistemas de frío/calor para una correcta operación del sistema y el balance requerido entre los mismos. Con este fin, se han instalado sistemas redundantes de generación de agua caliente y de simulación de carga térmica del lado frío, con el fin de mejorar las condiciones de operación de las bombas de calor en todo momento.

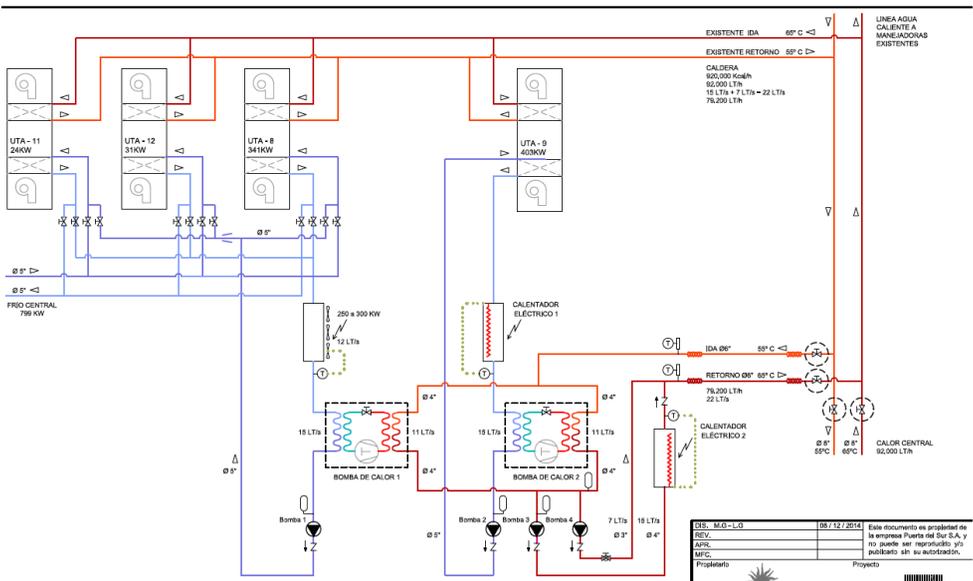


Figura 5. Incorporación de los equipos en la instalación existente.

Tal como se observa en la Figura 5, se ha instalado del lado frío de la bomba de calor 1, un fancoil de 300kW de potencia, con el fin de extraer calor del aire ambiente (colocado en los ductos generales de extracción de aire del edificio) y dos calentadores eléctricos de 300kW cada uno, uno del lado caliente y otro del lado frío de la bomba de calor 2.

Con estas redundancias, se asegura la correcta operación del sistema en todas las horas del año, si bien no maximizando el ahorro en toda condición, si permitiendo mantener las condiciones de confort en todo momento, con distintos niveles de ahorro, en función de los distintos equipos que se encuentren operando de forma simultánea.

En la condición de diseño del sistema, se envía agua fría a las UTAs (Unidades de Tratamiento de Aire) que lo requieren, el retorno de agua fría pasa por los evaporadores de las bombas de calor, generando del otro lado agua caliente, que se envía a todo el circuito de agua caliente del aeropuerto. Si los consumos de frío y calor no se encuentran debidamente equilibrados, los sistemas de apoyo actúan de forma escalonada, con el fin de mantener las condiciones de confort definidas.

Para el cálculo de ahorros del proyecto, se miden los consumos de energía eléctrica de las bombas de calor, los calentadores eléctricos de agua caliente, y el fan coil. A su vez, se miden las temperaturas de entrada y salida de agua fría y caliente de la bomba de calor, y las temperaturas de entrada y salida de agua fría al fan coil.

Para calcular el ahorro de gas natural, se determina el aporte de calor al sistema a partir de las temperaturas de entrada y salida de agua caliente a las bombas de calor y el caudal de agua caliente (el cual es casi constante en el circuito cerrado). Posteriormente, se calcula cuál hubiese sido el gasto de gas natural con el sistema antiguo y su rendimiento, y se le resta el gasto de energía eléctrica, tanto de las bombas de calor como de los calentadores eléctricos.

Por otro lado, para el cálculo del ahorro en el chiller, se toman las temperaturas de entrada y salida del agua fría de la bomba de calor del lado del evaporador, conjuntamente con el caudal de agua fría, restando el calor aportado por el fan coil a partir de los datos de temperatura a la entrada y salida del fancoil. Esto se compara con el rendimiento del chiller (que los meses de invierno a baja carga, cuenta con un COP de 1,7), con el fin de obtener de esta forma el ahorro de energía eléctrica en el sistema de enfriamiento.

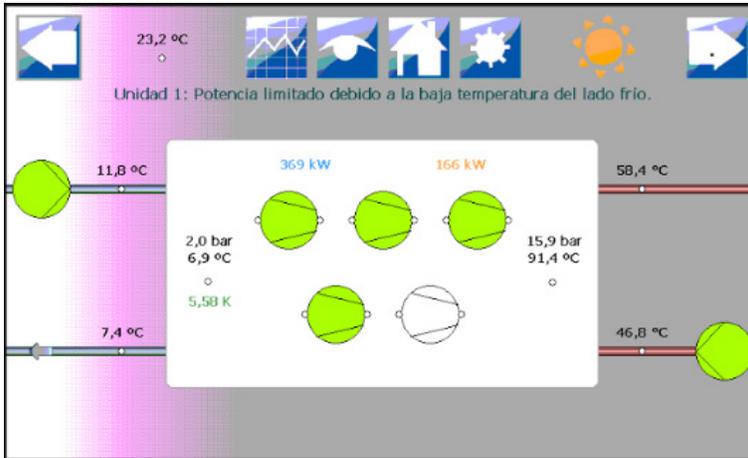


Figura 6. Funcionamiento de los equipos

A partir de la instalación de la bomba de calor se elimina el consumo de 24.500 Nm<sup>3</sup> de gas natural promedio mensual en los meses de uso, sustituyéndolo por 87.000kWh de energía eléctrica. Esto implica un ahorro mensual de promedio de USD 17.800.

Por otro lado, el uso de las bombas de calor permite el apagado del chiller en los meses del invierno), repercutiendo en un ahorro de energía eléctrica de USD16.500 mensuales. Considerando ambos aspectos, el ahorro total es de USD 190.000 anuales

El costo de las bombas de calor con sus periféricos e instalación ha ascendido a un total de USD 447.000. En las condiciones anteriores el repago simple de la inversión es de 2,4 años

## Recuperación de calor en Industria Frigorífica

En la totalidad de las industrias frigoríficas, se vierte a la atmósfera el calor extraído de la carne a través de un ciclo de refrigeración.

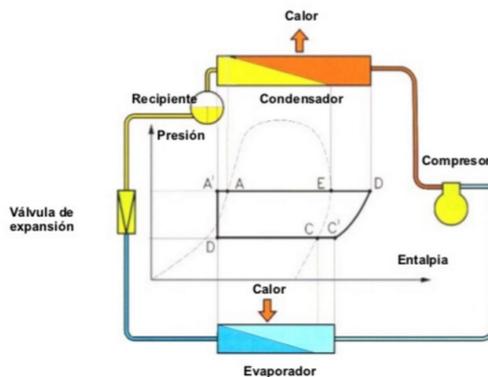


Figura 7. Ciclo de frío convencional

Por otro lado, se utiliza vapor para el calentamiento de agua, a través de una caldera e intercambiador.

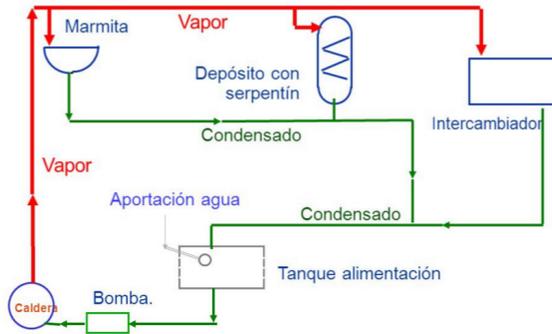


Figura 8. Generación de agua caliente a partir de vapor

En este caso de estudio en particular, los consumos de leña para generación de vapor ascienden a 20ton/día, con un costo asociado de USD 70/ton de leña, y un rendimiento del sistema generador de vapor/intercambiador de calor, del 82%, lo que implica un costo del millón de kCal, de USD 43/MkCal.

Existe un potencial de ahorro importante, a partir de conjugar los dos sistemas, con el fin de utilizar el calor volcado al ambiente por los condensadores, para el calentamiento de agua en un equipo de mucha mayor eficiencia (bomba de calor) que el utilizado actualmente para la generación de agua caliente:

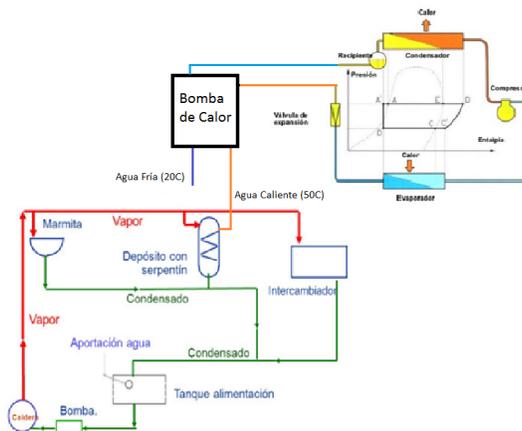


Figura 9. Combinación de ambos procesos.

Si bien la energía eléctrica que alimenta la bomba de calor tiene un costo mayor que la leña utilizada en la caldera (comparando los costos de los energéticos únicamente), la diferencia de rendimientos entre la caldera (80-85%) con intercambiador (85-90%) y la bomba de calor (650-700%) hacen que exista un significativo ahorro en los costos de calentamiento de agua.

El alto rendimiento del sistema planteado se debe en parte a que la fuente de suministro de calor para la bomba de calor (los condensadores de la instalación de frío) es medianamente constante a lo largo del año, y el calor requerido por el evaporador de la bomba de calor, es del orden del 15-20% de la capacidad de los condensadores del sistema de refrigeración. Esto permite, no solo trabajar al nuevo sistema en un punto de óptimo rendimiento en casi cualquier condición, sino también permite darle holgura al sistema de refrigeración central en los momentos de mayor demanda, permitiendo trabajar con una menor presión de condensación.

En este caso, la medición de ahorros es realizada con un contador de calorías, a partir de la sonorización de las temperaturas de entrada y salida del agua caliente, así como el caudal del agua que circula por la bomba de calor.

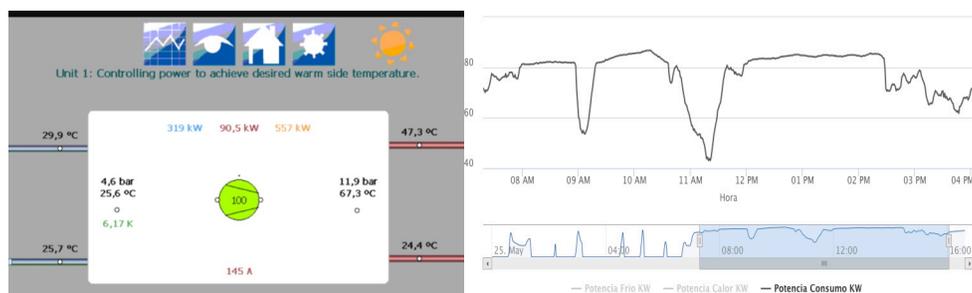


Figura 10. Medición de generación de calor y consumo de energía.

A partir de estos datos, el millón de kCal de agua caliente, ascienden a un costo de USD 17/MkCal, lo cual se traduce, para un gasto mensual de aproximadamente 500tons de leña, en un ahorro monetario de aproximadamente USD 17.500 mensuales.

A su vez, existen beneficios adicionales a partir de la implementación de este proyecto, como ser: disminución de la demanda de vapor del generador, ahorro de costos operativos en el generador de vapor, ahorro de energía eléctrica en los condensadores de frío, así como también de agua y productos químicos para su tratamiento, y ahorro de energía eléctrica en los compresores de frío por disminución de la presión de condensación (teniendo en cuenta que se debe manejar un mínimo de presión de condensación, de la cual no se deben bajar).

Sin tener en cuenta los beneficios adicionales mencionados anteriormente, para una inversión total del proyecto llave en mano de USD 250.000 aproximadamente, se obtiene un período de repago simple de 16 meses.

## CONCLUSIONES

Es posible concluir a partir de lo expuesto en el presente artículo, que, si bien suele existir un potencial de ahorro importante en lo referente a sistemas de recuperación de calor, y la aplicación de los mismos es posible en muy diversos ámbitos, es necesario contar con estudios previos de factibilidad, con el fin de determinar con la mayor certeza posible, el potencial de ahorro del proyecto en función de las necesidades de calor de cada instalación. Posteriormente, es deseable contar con sistemas redundantes, o de apoyo, que permitan continuar la operación normal de las instalaciones, aunque existan fallos en los nuevos sistemas. Por último, el cálculo de ahorros debe poder adecuarse a las distintas realidades y variaciones de operación de las instalaciones, pudiendo apoyarse en protocolos de medición debidamente ratificados por todas las partes, con el fin de obtener resultados certeros.