

05-027

DEVELOPMENT OF A DSS TOOL FOR OPTIMIZING COOLING AND PREECOOLING SYSTEMS FOR FRUITS AND VEGETABLES

Cervera Gascó, Jorge; Laserna Arcas, Santiago; Montero Martínez, Jesús;
Moreno Hidalgo, Miguel Ángel
UCLM

The main objective of the Master final report was the development of a decision support system tool (DSS) for the optimal design and dimensioning of cooling systems (hydrocooling and cooling rooms) for vegetables and fruits. The aim was minimizing the total cost (investment + operation), with special analysis of energy consumption and carbon footprint of the process. Two case studies were analyzed (cherries and broccoli) with different locations and harvesting dates, which demonstrated the functionality of the tool under different conditions. The main obtained conclusions were the following: - Heat transference values were more limited under the current energy cost context.- The optimal temperature after the hydrocooling usually is different than the traditional of 7/8.- The profitability of the hydrocooling depends on the energy price and the product.- The developed DSS tool can be applied to any case study with different energy and investment costs.

Keywords: *Energy efficiency; Cooling systems; Thermal isolation*

MODELACIÓN DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE FRÍO PARA DETERMINAR LAS TEMPERATURAS DE PRERREFRIGERACIÓN Y CONSERVACIÓN ÓPTIMAS PARA DISTINTOS PRODUCTOS HORTOFRUTÍCOLAS

El objetivo general del proyecto fin de Máster fue el desarrollo de una herramienta de ayuda a la toma de decisiones en el proceso de diseño y dimensionado óptimo de sistemas de refrigeración (hydrocooling y cámara de conservación) de frutas y verduras de forma que se minimice el coste total (inversión y operación) del sistema, con especial atención a la disminución del consumo energético y de la huella de carbono del sistema. Los dos casos de estudio (Cerezas y brócoli) fueron bien diferenciados con ubicaciones y fechas de recolección completamente distintas con el objetivo de demostrar la funcionalidad de la herramienta ante condiciones diferenciadas. Las conclusiones reflejaron: - Los valores de transferencia de calor deben ser más limitantes ante el actual contexto energético. - La temperatura de salida del hydrocooling de 7/8 no es siempre la idónea. - La rentabilidad del hydrocooling varía según cambios en el precio de la energía. - Esta herramienta es de aplicación ante cualquier contexto energético y de costes de inversión de materiales.

Palabras clave: *Eficiencia energética; Sistema de refrigeración; Aislante térmico.*

Correspondencia: Jorge Cervera Gascó Jorge.Cervera@uclm.es

1. Introducción

El desarrollo de este estudio surge como consecuencia de la realización del trabajo fin de Máster para la obtención del título de Máster Universitario en Ingeniería Agronómica.

La búsqueda de nuevas vías de ahorro energético y económico así como la reducción del impacto medioambiental nace como consecuencia de los elevados precios de la energía actuales y por el compromiso con los objetivos de disminución de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), tal y como establece el Real Decreto 163/2014, de 14 de marzo, por el que se crea el registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono y la gestión energética. Lo expuesto anteriormente resulta significativo en las industrias agroalimentarias en donde los consumos energéticos son grandes debido a los equipos existentes en sus instalaciones.

En las centrales hortofrutícolas se requiere la máxima atención a las condiciones higiénico-sanitarias de los alimentos y en particular a los más perecederos. Aquí es muy importante el consumo energético necesario para la conservación de los productos. La cadena del frío se ha afianzado y en estos momentos nos parece algo normal y difícil de sustituir. En los últimos años ha sufrido cambios importantes y es de esperar que en los próximos continúe modificándose y adaptándose a las nuevas necesidades (Domínguez & García, 2002).

En este caso los equipos de producción de frío utilizados para el estudio son un sistema de prerrefrigeración (Hydrocooling) y un sistema de conservación (cámara frigorífica). A continuación se explican los beneficios que aporta cada una de estas dos etapas y los equipos seleccionados.

El pre-enfriamiento de los productos frescos se realiza para evitar el deterioro de la calidad del producto, y por tanto para mejorar su estado de conservación, prolongando la vida final de éste. Esta fase siempre es muy importante, pero cobra mayor importancia en todos aquellos productos que tienen una elevada velocidad de respiración, así como en aquellas épocas en las que la climatología es más severa, con altas temperaturas que provocan que el producto de campo entre al almacén con temperaturas internas elevadas. Por tanto, para proporcionar el enfriamiento rápido que necesitan los productos, disminuir su transpiración y respiración y prolongar su vida postcosecha así como evitar el aumento de temperatura el hidroenfriamiento resulta idóneo para una correcta refrigeración.

El método de hydrocooling (con sistema tipo ducha), es uno de los que se utiliza con mayor frecuencia por la industria, siendo el más rápido y efectivo. Produce una refrigeración homogénea en la totalidad del producto, proporciona a la fruta u hortaliza tratada un aspecto fresco limpio y turgente, lo que mejora su presentación comercial; también permite efectuar simultáneamente algún tratamiento germicida, añadiendo al agua el o los productos apropiados (bactericidas o fungicidas); reduce notablemente las pérdidas de peso debido a la brevedad y eficacia del proceso, pues no extrae agua de los tejidos vegetales, como ocurre con el enfriamiento por otros métodos como el aire y el vacío (Melgarejo, 2000).

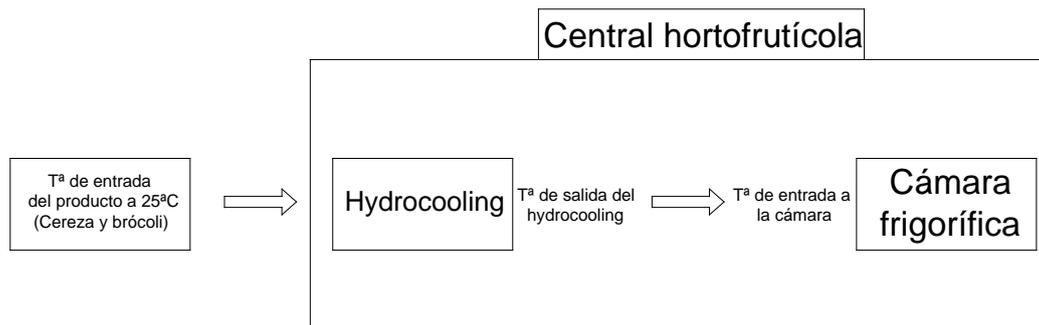
Además, se evita el sobredimensionado de las cámaras de conservación, ya que no tienen que eliminar el denominado "calor del campo" del producto (Brosnan & Sun, 2001).

La refrigeración previa a la carga y expedición del producto terminado será de conservación, donde se pretende mantener la calidad del producto mientras permanece en el almacén

(Lamúa, 1999). El equipo frigorífico necesario para realizar tal actividad va a ser la cámara de conservación.

Los sistemas de producción de frío se han analizado en bloque es decir, tratándose de un todo, de tal forma, que el proceso seguido por el producto tras su entrada a la industria es que pase al hydrocooling, donde se preenfía bajando la temperatura a un determinado valor, y posteriormente el producto pasa a la cámara frigorífica (figura 1) manteniendo la cadena de frío en todo momento. La temperatura de conservación de la cereza en la cámara frigorífica se ha establecido en 6°C, y para el brócoli en 2°C.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso seguido por el producto.



Para el dimensionado del sistema de prerrefrigeración el método tradicional se basa en el criterio de los 7/8 que hace referencia al tiempo requerido para que la temperatura inicial del producto disminuya 7/8 de la diferencia entre la temperatura inicial del producto y la del medio de enfriamiento. Este concepto nos dice que conforme va disminuyendo la temperatura de los productos hortofrutícolas, la velocidad de enfriamiento disminuye y aunque se aumente el tiempo del proceso, el enfriamiento logrado ya no es significativo (Becker & Fricke, 2001).

2. Objetivos

El principal objetivo planteado en este estudio es el desarrollar una herramienta de ayuda a la toma de decisiones en el proceso de diseño y dimensionado óptimo de sistemas de refrigeración (hydrocooling y cámara de conservación) de frutas y verduras. Se busca que el coste total del sistema (inversión y operación) se minimice, prestando especial atención a la disminución del consumo energético, y por lo tanto, disminución de la huella de carbono del sistema.

Los objetivos específicos planteados son: calcular los valores de transmisión de calor óptima para los casos de estudio mediante la selección óptima de espesores de aislante en las paredes, suelo y techo, y determinar la temperatura de prerrefrigeración óptima de los productos.

3. Metodología

3.1. Localización y datos de partida

Para la realización de este estudio se han planteado dos escenarios: una central frutícola de cereza y una central hortícola de brócoli. La elección de estos productos se ha debido a la

diferente ubicación que presentan, a los efectos post-recolección que presentan y a la buena disponibilidad con los métodos empleados.

Para el caso de la cereza, la central se ha ubicado en la zona norte de la provincia de Alicante (Valle de Gallinera), donde el cultivo de la cereza está muy bien implantado. Esta zona es ideal, ya que dispone de un microclima idóneo para su cultivo. La campaña de recolección de la cereza empieza en esta zona a mediados de Abril y termina a mediados de Junio. Para el dimensionamiento de las instalaciones de refrigeración, la mayor cantidad de producto registrada en un día en cámara frigorífica es de 60.000 kg y el día con mayor entrada de producto en la industria es de 30.000 kg.

La central hortícola para el brócoli se ha localizado en la provincia de Albacete. La campaña de recolección del brócoli de segunda cosecha, va de mediados de agosto a finales de octubre. La mayor cantidad de producto registrada en un día en cámara frigorífica es de 95.000 kg y el día con mayor entrada de producto en la industria es de 45.000 kg.

Los datos de temperaturas medias diarias han sido obtenidos de las estación climáticas más cercanas a en las zona de cultivo tanto para la cereza (estación de Planes (Alicante), con coordenadas UTM X=729927, Y=4296220, altitud: 519 m) como para el brócoli (estación de Albacete, con coordenadas UTM X=599200, Y=4317150, altitud: 709 m).

Debido a la dificultad de obtener los datos de temperaturas de entrada del producto con exactitud por desconocimiento del momento de recolección se ha establecido un valor promedio teniendo en cuenta las fechas de recolección. Por tanto, el valor medio de entrada del producto a la industria para la determinación de las temperaturas de prerrefrigeración y aislamiento óptimos es de 25°C.

3.2. Cálculo de la instalación frigorífica

La instalación frigorífica se ha calculado teniendo en cuenta los volúmenes mencionados anteriormente y características del producto, tales como el calor específico (0,87 y 0,92 kcal·kg⁻¹·°C⁻¹ para la cereza y brócoli, respectivamente) y el calor de respiración del producto (1,5696 y 0,7365 kcal·kg⁻¹·día⁻¹ para la cereza y brócoli, respectivamente).

Los pasos seguidos para su cálculo han sido los siguientes.

Cálculo del aislamiento de la cámara.

Se han calculado las necesidades de aislante para todos los días de duración de la campaña de recolección, así como su potencia frigorífica, obteniéndose el dato más desfavorable y representativo con el que se dimensiona toda la instalación, realizando un análisis para diferentes valores de pérdidas de calor por paredes, suelo y techo. Los espesores de aislante evaluados fueron los comerciales entre 60 y 200 mm.

Para el aislamiento de la cámara se ha utilizado panel sándwich relleno de poliestireno expandido en paredes y techo. El panel sándwich está compuesto por dos láminas de acero galvanizado de 2 mm de espesor rematado con pinturas plásticas con una conductividad $\lambda = 50$ kcal/h/m °C. El poliestireno expandido utilizado en el panel sándwich tiene una conductividad térmica $\lambda = 0,028$ kcal/h/m °C.

Cálculo de la potencia frigorífica:

La potencia frigorífica (en kcal/h) se determina considerando las cargas térmicas de diferente origen, como son:

- Carga térmica debida a la pérdida por transmisión de calor por paredes, techo y suelo.
- Carga térmica debida a las necesidades por renovación del aire.
- Carga térmica debida a las pérdidas por refrigeración y/o congelación.
- Carga térmica debida a las necesidades de conservación de los productos.
- Carga térmica debida al calor desprendido por los ventiladores.
- Carga térmica debida al calor desprendido por circulación de operarios en las cámaras.
- Carga térmica debida a las necesidades por iluminación.
- Carga térmica debida a las necesidades por pérdidas diversas.

Dimensionamiento de los equipos de frío:

Mediante el dato de la potencia frigorífica, se ha calculado la instalación frigorífica por compresión mecánica desarrollándose una aplicación informática que determina las condiciones termodinámicas del líquido refrigerante (R404A en este caso) para cada condiciones del ciclo de refrigeración. El ciclo utilizado ha sido el de Mollier.

De esta manera se han dimensionado los componentes de la instalación de frío, como son el evaporador, el condensador, el compresor y la válvula de expansión.

Cálculo de los costes:

Se han calculado los costes de aislante y de los equipos de producción de frío mediante la consulta de datos de la web, catálogos comerciales y empresas especializadas.

El coste energético de conservación en la cámara frigorífica se ha calculado teniendo en cuenta un número de horas de funcionamiento máximo, establecido en 18 horas diarias, obteniendo las necesidades de potencia en kW·h diarias y analizando diferentes costes energéticos comprendidos entre los valores 0,2, 0,3 y 0,4 €/kW·h.

3.3. Cálculo del sistema de prerrefrigeración por hydrocooling

Para el caso del sistema de prerrefrigeración por hydrocooling, el método que se ha seguido es el propuesto por la fundación ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) (Becker y Fricke, 2001). Este método se basa en los siguientes parámetros. Este método se basa en el cálculo del tiempo de prerrefrigeración, el calor de refrigeración y el balance en el depósito de agua.

Al igual que para el cálculo de la instalación frigorífica mediante el dato de la potencia frigorífica, se ha calculado el hydrocooling por compresión mecánica desarrollándose una aplicación informática que determina las condiciones termodinámicas del líquido refrigerante (R407C en este caso) para cada condiciones del ciclo de refrigeración.

El sistema de prerrefrigeración (Hydrocooling) se ha analizado mediante dos vías. La primera de ellas tiene en cuenta el método tradicional de la temperatura de los 7/8 y la segunda de ellas tiene en cuenta la temperatura comprendida dentro de un intervalo establecido, siendo su máximo valor la temperatura de llegada del producto y su mínimo el de conservación del producto.

El coste energético para el sistema de prerrefrigeración se ha determinado mediante la obtención del número de cargas máximo según el número de horas de funcionamiento y el tiempo estimado del proceso para la temperatura que se quiera alcanzar. Esto permite

obtener la carga del hydrocooling, dependiente de su capacidad y de la entrada de producto a la industria, para una temperatura a alcanzar dada y obteniendo el tiempo (t) empleado en realizar esa carga diaria.

A partir del tiempo de funcionamiento diario y de la potencia calculada del compresor, se determina la energía necesaria.

Según el coste de la energía (en este estudio 0,2, 0,3 y 0,4 €·kW⁻¹·h⁻¹) obtenemos el coste energético que se produce para cada día, e integrándolo en toda la campaña, el coste energético anual.

3.4. Anualización de la inversión

Para calcular los costes anuales, es preciso anualizar la inversión (del aislamiento y de los equipos de producción de frío, tanto del hydrocooling como de la cámara de conservación). La expresión utilizada para ello es el *Capital Recovery Factor* o Coste de Recuperación del Capital (CRF):

$$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (1)$$

Siendo N la vida útil considerada, e "i" la tasa de interés.

La herramienta desarrollada permite interactuar con las variables Vida Útil, Tasa de Interés, incluso con diferentes formas de financiar la inversión.

Los resultados obtenidos y expuestos en esta comunicación proceden de considerar que la inversión se financia exclusivamente con fondos propios, para una vida útil de 20 años y una tasa de interés del 5%.

3.5. Coste anual de conservación del producto

Tras aplicar todo este proceso se calcula el coste anual total de conservación de los productos (cereza y brócoli) como la suma de los costes de inversión anualizados más los costes energéticos de la prerrefrigeración y de conservación en la cámara.

3.6. Herramienta informática

Toda esta metodología de cálculo se ha implementado en una aplicación informática, de momento en EXCEL® (de Microsoft Inc.), pero se está programando en MATLAB® (de MathWorks Inc.), con el fin de que sea una herramienta fácil de manejar, versátil, en un entorno amigable, que permita analizar y optimizar el proceso de conservación por refrigeración de frutas y hortalizas, para cualquier producto, en cualquier localización y con diferentes condiciones de conservación.

4. Resultados

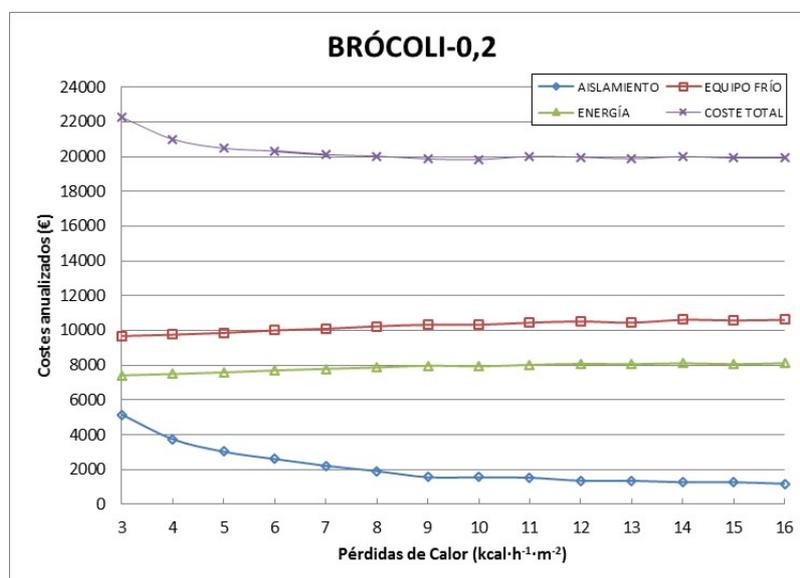
Tras aplicar la herramienta informática desarrollada, se presentan a continuación los resultados obtenidos en cuanto a la optimización de los espesores de aislamiento y de las temperaturas de prerrefrigeración, buscando en todos los casos la solución que minimiza el coste total anualizado de conservación de los productos.

4.1. Determinación de los espesores de aislamiento óptimos

Para la determinación de los espesores de aislamiento óptimos se han analizado los valores de pérdidas de calor en paredes, suelo y techo comprendidos entre 3 y 14 kcal·h⁻¹·m⁻² para

la cereza y 3 y 16 kcal·h⁻¹·m⁻² para el brócoli. Se busca el valor óptimo de pérdidas de calor que minimiza el coste total (inversión y operación) de la cámara frigorífica. En la figura 2 se ha representado la evolución de los costes anuales totales para la conservación del brócoli, junto a los costes unitarios del aislamiento, de los equipos de frío y de la energía (considerando un precio de la energía de 0,2 €·kW⁻¹·h⁻¹), todo ello función de las pérdidas de calor consideradas. Se comprueba cómo conforme aumentan las pérdidas de calor, el coste en aislamiento disminuye, pues resultan, lógicamente, espesores de aislantes menores. Por el contrario, conforme aumentan las pérdidas consideradas, aumentan los costes de los equipos de frío y los gastos energéticos. Globalmente, el coste mínimo, para el caso del brócoli, se consigue con un dimensionamiento de aislante que provoca unas pérdidas de calor de 9 kcal·h⁻¹·m⁻². El espesor de aislante resultante para estas pérdidas es el mínimo, 0,06 m, para paredes y suelo, y 0,1 m para el techo.

Figura 2. Evolución de los costes de aislamiento, de equipos de frío, energéticos y totales, para la conservación del brócoli, en función de las pérdidas de calor permitidas, y para un precio de la energía de 0,2 €kW⁻¹·h⁻¹



Los costes totales son mayores cuando las pérdidas de calor son muy pequeñas, pues son necesarios mayores espesores de aislantes, lo cual lleva a la conclusión que no es óptimo aislar las cámaras al máximo para reducir las pérdidas de calor al mínimo. A partir de unas pérdidas de 8-9 kcal·h⁻¹·m⁻² los costes totales se mantienen más o menos constantes.

De los tres componentes del coste total, el coste de inversión de los equipos de frío es el más importante en cuanto valor absoluto, seguido del coste energético. Sin embargo, es el coste del aislamiento el más sensible respecto al coste total, ya que para pequeños valores de pérdidas, el aumento en ambos casos es considerable.

En las figuras 3 y 4 se han representado los costes anuales totales de conservación de ambos productos, brócoli y cereza, en función de las pérdidas de calor por paredes, suelo y techo y para los tres precios de la energía considerados. Para ambos productos, la tendencia es similar, comprobando como se produce un descenso continuo del coste de conservación en la cámara, para los diferentes valores del precio de la energía, conforme aumentan las pérdidas de calor por paredes, suelo y techo, desde 3 hasta 8 kcal·h⁻¹·m⁻², en el caso de la cereza, y hasta 9 kcal·h⁻¹·m⁻² en el caso de brócoli. A partir de estos valores,

que se consideran los óptimos, los costes se mantienen prácticamente constantes hasta los valores máximos de pérdidas considerados.

Figura 3. Valor óptimo de pérdidas de calor por paredes, suelo y techo en cámara de conservación de brócoli.

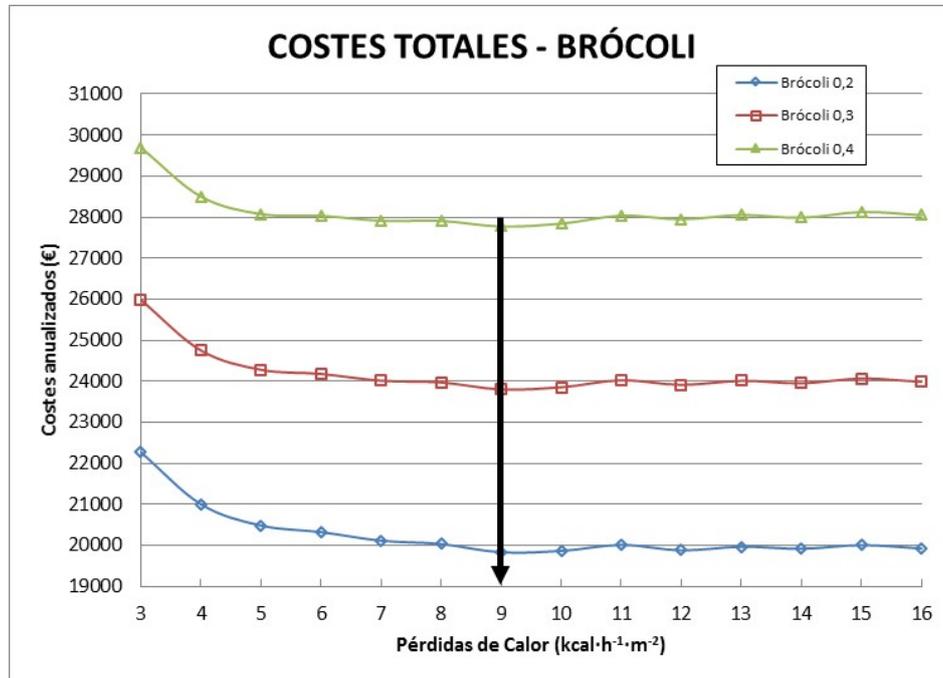
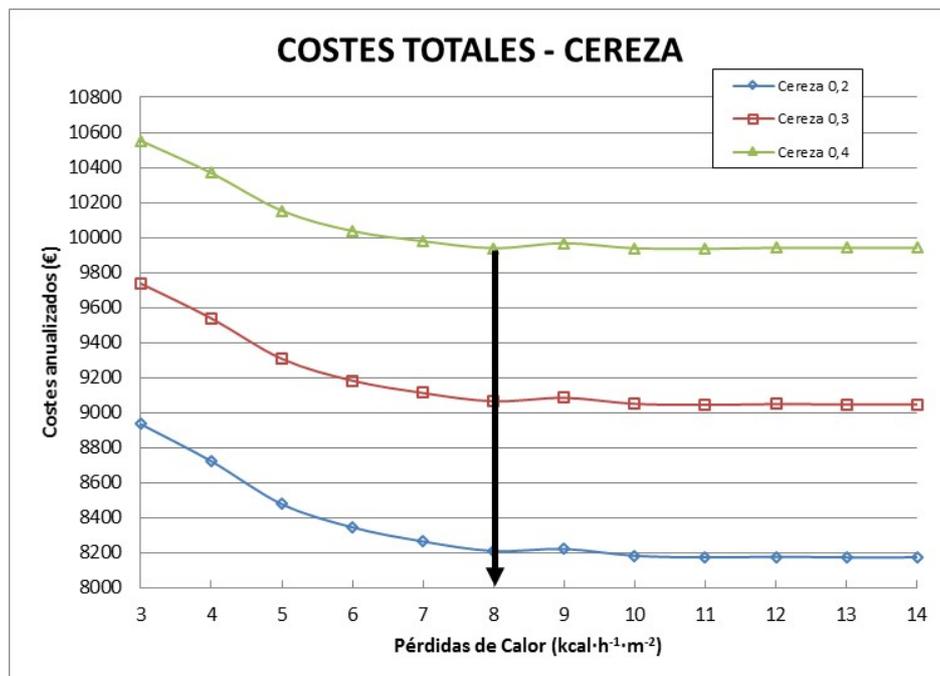


Figura 4. Valor óptimo de pérdidas de calor por paredes, suelo y techo en cámara de conservación de cereza.



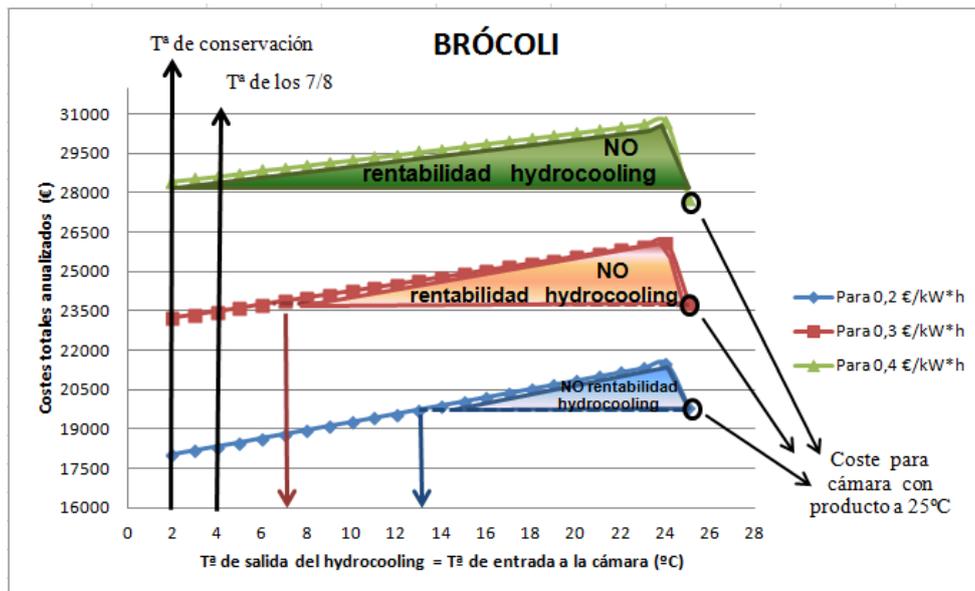
4.2. Determinación de las temperaturas de prerrefrigeración óptimas

Como se ha comentado en el apartado de metodología, el sistema consta de un sistema de prerrefrigeración mediante hydrocooling y un sistema de conservación con cámara frigorífica.

Buscando cual es la temperatura de prerrefrigeración óptima (t^a de salida del hydrocooling= t^a de entrada en la cámara de conservación) que minimiza el coste total de conservación de los productos, se ha aplicado el modelo. Se han considerado las cámaras de conservación calculadas con los espesores de aislante que se han obtenido como óptimos según el apartado anterior.

En las figuras 5 y 6 se ha representado la evolución de los costes de conservación en función de la temperatura de prerrefrigeración o temperatura de entrada a la cámara, para ambos productos y con los diferentes precios de la energía. Se han marcado en las figuras la situación de no hydrocooling, así como la temperatura con los costes mínimos y la temperatura de los 7/8, que en el caso del brócoli corresponde a 4°C y para la cereza, 8,4°C.

Figura 5. Análisis de las temperaturas óptimas de prerrefrigeración para el brócoli



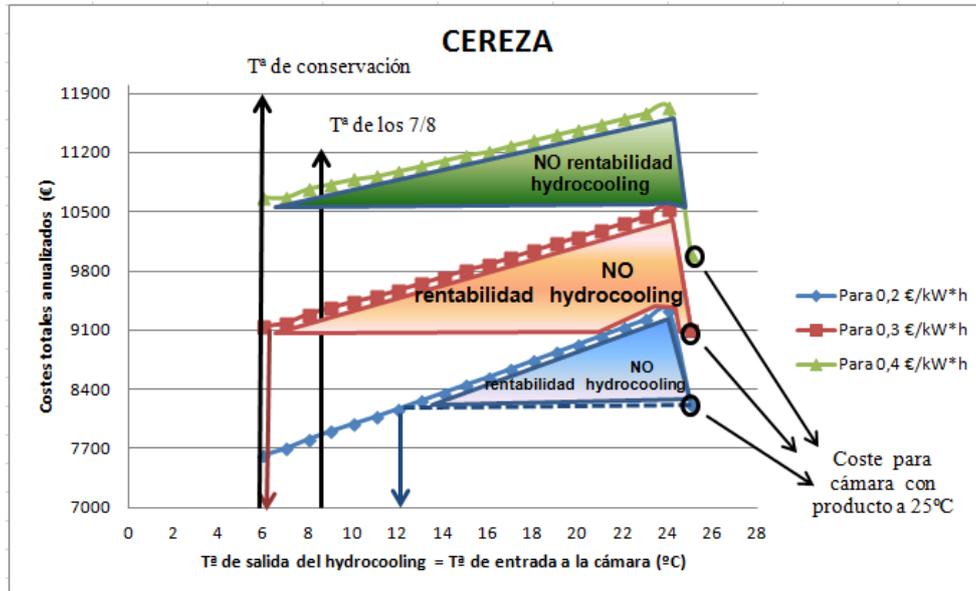
En el caso del brócoli, y para un precio de la energía de 0,2 $\text{€}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, el hydrocooling es rentable siempre que la temperatura de prerrefrigeración sea menor o igual a 13°C. Para temperaturas superiores los costes son superiores a la situación de no existencia de hydrocooling. Además, el coste mínimo no se obtiene con la temperatura de los 7/8, sino con la temperatura de conservación en la cámara de 2°C. Los ahorros obtenidos han sido de 352,5 € representando el 1,95% respecto al modelo tradicional de diseño de los 7/8.

Para el caso de 0,3 $\text{€}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, al aumentar el precio de la energía limita las posibilidades de tener un sistema de preenfriado. Resulta rentable tener en nuestra instalación un hydrocooling hasta una temperatura de salida del hydrocooling y de entrada a la cámara de 6°C, ya que a partir de este valor no interesa tenerlo porque los costes son superiores a los

de tener una cámara frigorífica únicamente. Los ahorros obtenidos han sido de 354,72 € representando el 1,50 % respecto al modelo tradicional.

Para el caso de $0,4 \text{ €kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, al aumentar mucho el precio de la energía, no resulta rentable tener en la instalación un sistema de preenfriado (Hydrocooling), ya que para cualquier temperatura de prerrefrigeración se supera los costes respecto a tener una cámara frigorífica únicamente.

Figura 6. Análisis de las temperaturas óptimas de prerrefrigeración para la cereza



En el caso de la cereza, y para un precio de la energía de $0,2 \text{ €kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, el hydrocooling es rentable siempre que la temperatura de prerrefrigeración sea menor o igual a 12°C . El coste mínimo no se obtiene con la temperatura de los 7/8, sino con la temperatura de conservación en la cámara de 6°C . Los ahorros obtenidos han sido de 172 € representando el 2,2 % respecto al modelo tradicional.

Para el caso de $0,3 \text{ €kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, se podría prescindir de tener el sistema de preenfriado, ya que prácticamente el coste se iguala con el de la cámara frigorífica.

Para el caso de $0,4 \text{ €/kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, al igual que pasa con el brócoli, no resulta rentable tener en la instalación un sistema de preenfriado con hydrocooling.

Lo anteriormente descrito nos indica que los costes de equipos de cámara frigorífica son muy altos. También hay unas demandas altas de energía tanto en el sistema de preenfriado como en la cámara frigorífica. Conforme el precio de la energía aumenta, los costes de la energía en los dos sistemas de producción de frío superan ampliamente los costes de equipos y los otros costes con una subida muy pronunciada.

Este comportamiento se justifica puesto que el sistema hydrocooling consume una gran cantidad de energía para extraer el calor necesario del producto para llevarlo a una temperatura adecuada para su almacenamiento en un tiempo muy reducido, con el consiguiente beneficio de cara a la calidad del producto. La cámara conlleva un elevado coste de inversión, pero en el caso de tener que enfriar el producto desde la temperatura de entrada hasta la de conservación, el tamaño de los equipos de refrigeración se incrementaría elevando el coste en equipos.

Así, el coste energético es una variable clave al analizar la viabilidad de inclusión de un sistema de prerrefrigeración. En caso del coste energético actual, que se puede estimar en $0,2 \text{ €}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, es aconsejable contar con un hydrocooling, de forma que la inversión en este equipo, se pueda ver compensada con la menor inversión en equipos en la cámara. Además, el producto se enfría de forma rápida mejorando su calidad de almacenamiento.

Sin embargo, cuando se incrementa el coste energético ($0,3\text{-}0,4 \text{ €}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) la viabilidad de instalación de este tipo de equipo de prerrefrigeración se ve comprometida, ya que al enfriar en un periodo de tiempo muy corto, el consumo energético es elevado, y por lo tanto su coste.

En caso de disponer de sistemas hydrocooling, la opción más económica, en cualquier caso, es llevar el producto hasta la temperatura de conservación en cámara, y no como se venía haciendo hasta ahora de considerar la temperatura de $7/8$. Es decir, que es preferible, una vez decididos a hacer la inversión en este tipo de sistemas, disponer de un hydrocooling potente que permita disminuir la temperatura del producto hasta la de conservación.

5. Conclusiones

La herramienta desarrollada ha resultado muy útil en cuanto a los objetivos planteados y se han obtenidos resultados muy positivos y concluyentes acerca del comportamiento de los sistemas de frío analizados, por una parte con un sistema de preenfriado (hydrocooling) previo a la entrada de producto a la cámara de conservación, y de la propia cámara de conservación. El modelo es aplicable a cualquier producto hortofrutícola que necesite refrigeración, y para cualquier localización.

En primer lugar, se ha puesto de manifiesto que es esencial hacer un análisis exhaustivo para determinar las pérdidas de calor por paredes suelo y techo, considerando no sólo los aspectos de inversión, sino los derivados del consumo de energía. En los casos estudiados, ha resultado óptimo contemplar unas pérdidas de calor por paredes, suelos y techo alrededor de $8\text{-}9 \text{ kcal}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

Se ha estudiado la rentabilidad de tener un sistema de preenfriado, en este caso un hydrocooling, en la instalación. El sistema de preenfriado demanda unas elevadas cantidades de energía, por tanto ante subidas importantes en el precio de la energía, no resulta rentable.

Se ha observado que el método tradicional de cálculo de la temperatura de salida del hydrocooling, los $7/8$, no es la más adecuada, ya que es preferible que la temperatura de salida del hydrocooling sea la de conservación en cámara, de tal forma que el hydrocooling trabaje al máximo posible para bajar la temperatura del producto desde su entrada hasta la de conservación en la cámara frigorífica. De este modo evitaremos el sobredimensionado de los equipos de la cámara.

No se han considerado los beneficios obtenidos al instalar un sistema de prerrefrigeración derivados del incremento de la calidad del producto, lo que en muchas ocasiones determina el requerimiento de este tipo de sistemas. En todo caso, con esta herramienta se pueden incluir nuevas variables para nuevos escenarios.

BIBLIOGRAFÍA

- Becker, B.R., & Fricke, B.A. (2001). Hydrocooling time estimation methods. *Mechanical Engineering*. University of Missouri-Kansas City.
- Brosnan, T., & Sun, D. (2001). Precooling techniques and applications for horticultural Products. *International Journal of Refrigeration*, 24, 154-170.
- Domínguez, M., & García, C. (2002). La distribución a temperatura controlada de productos perecederos en Europa. *Alimentación*, 169, 45-48.
- Lamúa, M. (1999). Aplicación del frío a los alimentos. Ed. AMV.
- Melgarejo, P. (2000). Cámaras frigoríficas y túneles de enfriamiento rápido. Ed. AMV.
- Real Decreto 163/2014, de 14 de marzo, por el que se crea el registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono. *Boletín Oficial del Estado*, 29 de marzo de 2014, núm. 77, pp. 27437-27452.