

05-316

Thermal Load Analysis and Refrigeration Infrastructure Design for the Agri-food Industry: A Case Study in Vegetable Pre-cooling

Luis Miguel Serna Jara¹, Jose Antonio Flores Yepes²

¹Universidad a Distancia de Madrid, UDIMMA ²Universidad Miguel Hernández

This paper presents the integral design and calculation of an industrial refrigeration facility for processing 60 daily tons of lettuce in the Cartagena region. The project is developed within a pre-existing 500 m² warehouse, implementing two distinct chambers: rapid pre-cooling (pull-down to 5°C in 3 hours) and storage (0°C). The methodology includes a technical comparison of thermal insulators, selecting polyurethane for its low conductivity, and a detailed thermal load calculation. Results reveal a total load of 395 kW, where 77% corresponds to product cooling load, highlighting the critical importance of equipment sizing in rapid pull-down processes versus transmission or service loads.

Keywords: Thermal load, refrigeration, agri-food industry

Análisis de Cargas Térmicas y Diseño de Infraestructura Frigorífica para la Industria Agroalimentaria: Caso de Estudio en Pre-refrigeración de Vegetales

Este trabajo presenta el diseño y cálculo integral de una instalación frigorífica industrial para el procesamiento de 60 toneladas diarias de lechuga en el Campo de Cartagena. El proyecto se desarrolla en una nave preexistente de 500 m², donde se implantan dos cámaras diferenciadas: una de pre-refrigeración rápida (abatimiento a 5°C en 3 horas) y una de conservación (0°C). La metodología incluye una comparativa técnica de aislantes térmicos, seleccionando el poliuretano por su baja conductividad, y un cálculo detallado de cargas térmicas. Los resultados revelan una carga total de 395 kW, donde el 77% corresponde a la carga por enfriamiento de producto, destacando la importancia crítica del dimensionamiento de equipos en procesos de abatimiento rápido frente a las cargas por transmisión o servicios.

Palabras clave: Carga térmica, refrigeración, industria agroalimentaria



©2026 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La conservación postcosecha de productos hortofrutícolas constituye un factor crítico en la cadena de suministro agroalimentaria, condicionando tanto la calidad final del producto como su viabilidad comercial. En productos de alta tasa respiratoria como la lechuga (*Lactuca sativa*), el control térmico inmediato tras la recolección resulta determinante, ya que el denominado "calor de campo" acelera los procesos de senescencia, deshidratación y proliferación microbiana. El denominado "calor de campo" corresponde a la energía térmica acumulada por el producto durante su permanencia en condiciones ambientales tras la recolección, constituyendo una de las principales fuentes de deterioro postcosecha.

En este contexto, el preenfriamiento es una etapa clave dentro de la cadena de frío, cuya eficiencia depende directamente del mecanismo de transferencia de calor empleado. Tradicionalmente, este proceso se ha llevado a cabo mediante sistemas de convección forzada en cámaras frigoríficas; sin embargo, hay otras tecnologías como el vacuum cooling que permiten reducir los tiempos de enfriamiento mediante la evaporación del agua interna del producto a baja presión.

El presente estudio aborda el diseño de una instalación frigorífica para el procesado de 60 toneladas diarias de lechuga en la Región de Murcia, evaluando dos alternativas tecnológicas de preenfriamiento: cámara de aire forzado y sistema de enfriamiento por vacío. El objetivo principal es analizar comparativamente ambas soluciones desde el punto de vista técnico, energético y constructivo, identificando sus implicaciones en el dimensionamiento de la instalación y en la calidad final del producto.

Como señala ASHRAE (2022), la actividad metabólica de los vegetales no cesa tras la recolección; por el contrario, el "calor de campo" afecta a la durabilidad del producto de manera considerable. En este contexto, la refrigeración no es simplemente un método de almacenamiento, sino una herramienta de gestión crítica. Según Hernán (2013), el diseño de una instalación debe partir de un balance energético exhaustivo que considere no solo las condiciones externas, sino la naturaleza biológica del producto.

La normativa española, a través del Reglamento de Seguridad para Instalaciones Frigoríficas (RSIF) y sus Instrucciones Técnicas Complementarias (MI-IF), establece que el diseño debe garantizar la estanqueidad y la eficiencia energética. A esto se suma la exigencia del Código Técnico de la Edificación (CTE DB-HE), que obliga a optimizar la envolvente térmica para reducir la demanda energética. Autores como Torrella Alcaraz (2014) sostienen que la "rapidez de enfriamiento" es el parámetro que define el éxito de una instalación agroalimentaria, especialmente en productos de alta tasa respiratoria como la lechuga (*Lactuca sativa*). Un retraso de pocas horas en el abatimiento térmico puede reducir la vida útil comercial en días, lo que justifica la necesidad de infraestructuras de pre-refrigeración de alta potencia (Dossat, 2000). El presente estudio analiza la complejidad técnica de dimensionar una planta capaz de procesar 60 toneladas diarias, donde el equilibrio entre la transferencia de calor y el consumo energético define la viabilidad del proyecto.

1.1 Caso de estudio y condiciones de diseño.

El control de la temperatura es el parámetro más crítico en la logística de productos perecederos. En la Región de Murcia, la exportación de lechugas requiere protocolos estrictos de cadena de frío que comienzan inmediatamente después de la recolección. El presente caso de estudio aborda el diseño de una instalación para la empresa "HORTILECHU", ubicada en el Campo de Cartagena, con el objetivo de procesar 60.000 kg diarios de producto.

El problema de ingeniería consiste en la adaptación de una nave industrial existente de 500 m² (con 7 metros de altura) para albergar cámaras de frío capaces de realizar un abatimiento

de temperatura (pre-cooling) de temperatura ambiente a 5°C en un ciclo reducido de 3 horas, y su posterior mantenimiento a 0°C.

La nave destinada a la actividad es de nueva adquisición y presenta una estructura metálica formada por cerchas, solución constructiva habitual en instalaciones agroindustriales debido a su resistencia estructural y a la posibilidad de cubrir grandes luces con una adecuada relación coste-eficiencia. La altura libre interior de la nave, correspondiente a la altura de pilares, es de 7 m, lo que permite la instalación de cámaras frigoríficas y zonas de manipulación con suficiente volumen operativo.

El producto será recolectado en campo y posteriormente transportado hasta la nave mediante camiones con capacidad de carga de 32 toneladas. Considerando una producción diaria de 60 toneladas, se prevé que la recepción de mercancía se realice en dos lotes de aproximadamente 30 toneladas cada uno. El primero de ellos llegará durante la mañana y el segundo durante la tarde, estableciendo así un flujo logístico escalonado que facilita las operaciones de pre-refrigeración y almacenamiento.

Las lechugas se transportarán envasadas en cajas de fibra con dimensiones exteriores aproximadas de 521 × 343 × 267 mm. Estas cajas se agruparán sobre palets con una configuración de 30 cajas por unidad de carga. Las características dimensionales y de peso tanto de las cajas individuales como de los palets completos se recogen en una tabla técnica que debe situarse inmediatamente después del párrafo donde se describen las características del embalaje, con el fin de facilitar la consulta de los parámetros utilizados en los cálculos de capacidad y densidad de almacenamiento.

Tabla 1: Características físicas y logísticas del embalaje y unidad de carga de la lechuga.

Producto	Tipo de embalaje	Dimensiones exteriores mm	Peso medio Bruto del embalaje kg	Peso Neto medio del embalaje kg	Densidad Bruta media kg/m ³	Densidad Neta Media kg/m ³
Lechuga cogollo	Caja fibra	521x343x267	17	15.9	395	
	Palet 30 cajas	1067x1270x1676	612.9	531.2	269	234

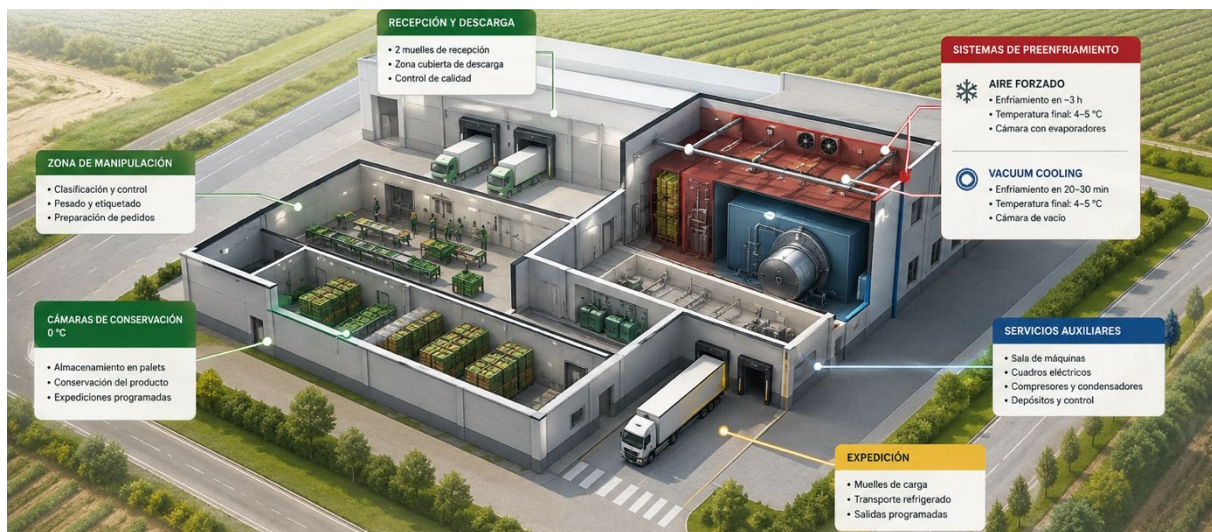
En relación con el proceso frigorífico, la recepción de dos lotes de 30 toneladas condiciona el dimensionamiento de la cámara. Dado que el producto debe someterse a un proceso de pre-refrigeración con una duración máxima de tres horas. La cámara, por tanto, deberá disponer de una capacidad mínima equivalente a un lote completo, es decir, 30 toneladas. Este criterio permite que, mientras el primer lote se encuentra en proceso de enfriamiento, una vez finalizado, pueda trasladarse el producto a la cámara de conservación antes de la llegada del segundo lote. De este modo se mantiene la continuidad operativa del proceso sin necesidad de sobredimensionar innecesariamente el volumen de pre-refrigeración.

La disposición de la mercancía en el interior de las cámaras frigoríficas se realizará de forma que se minimicen las interferencias en la circulación del aire, condición fundamental para garantizar un intercambio térmico adecuado entre el aire y el producto. La estiba se efectuará en pilas o lotes que respeten las distancias mínimas recomendadas para favorecer la distribución homogénea del aire. En este sentido, se considerará una separación mínima de 10 cm en la base entre unidades de carga, salvo que las características del envase permitan el contacto directo, 15/20 cm respecto a paredes, 30/40 cm respecto del fondo para la circulación de aire en sistemas de convección forzada, 10 cm respecto al suelo y 100/150 cm respecto a los evaporadores en sistemas de ventilación forzada. Asimismo, se deberán prever

pasillos o espacios libres suficientes que permitan la inspección de las cargas y el acceso para las operaciones de mantenimiento y control.

En cuanto a la manipulación interna de la mercancía, el transporte dentro de la nave se realizará mediante transpaletas, lo que condiciona tanto el diseño de los pasillos de circulación como la organización de las zonas de carga, descarga y almacenamiento. Finalmente, la mercancía se almacenará en una configuración de estiba de un único palet en altura, criterio adoptado para preservar la integridad del producto, facilitar la ventilación entre unidades de carga y simplificar las operaciones de manipulación.

Figura 1: Infografía planta agroalimentaria de lechugas



El caso de estudio, la instalación está ubicada en la Región de Murcia, caracterizada por elevadas temperaturas ambientales durante la campaña de recolección.

El proceso térmico se divide en dos etapas diferenciadas:

- Preenfriamiento: reducción de la temperatura del producto desde condiciones de campo ($\approx 25\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$) hasta una temperatura de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un tiempo máximo de 3 horas.
- Conservación: mantenimiento del producto a una temperatura de $0\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta su expedición.

Desde el punto de vista geométrico, la instalación se desarrolla en el interior de una nave industrial existente de 500 m^2 de superficie y 7 m de altura libre, lo que introduce restricciones en el diseño volumétrico de las cámaras frigoríficas y en la disposición de los equipos.

Adicionalmente, el sistema debe cumplir con los siguientes requisitos técnicos:

- minimizar el tiempo de enfriamiento para preservar la calidad del producto
- garantizar una distribución homogénea de la temperatura en el interior de las cargas
- optimizar el consumo energético del proceso
- adaptarse a la logística de manipulación mediante palets y transpaletas

Este escenario plantea la duda sobre la selección del sistema de preenfriamiento, abordando en este estudio, el análisis de dos alternativas tecnológicas: el preenfriamiento mediante aire forzado en cámara frigorífica y el enfriamiento por vacío (vacuum cooling), evaluando su impacto en el dimensionamiento de la instalación y en la eficiencia del proceso.

1.2 Tecnologías de preenfriamiento

1.3.1. Preenfriamiento mediante aire forzado

El sistema de preenfriamiento por aire forzado se basa en la circulación de aire frío (sistema denominado de convección forzada) a través del producto mediante ventiladores, generando un proceso de transferencia de calor desde el producto al medio: aire.

El aire es enfriado mediante evaporadores y forzado a atravesar los palets de producto. Se puede forzar la eficiencia, mediante configuraciones de túnel o mediante el uso de lonas interiores que obligan al flujo de aire a atravesar la carga.

El enfriamiento se produce mediante:

- convección entre el aire y la superficie del producto
- conducción desde el interior del producto hacia su superficie

Este mecanismo se indica especialmente en productos apilados o con embalajes que dificultan el flujo de aire.

Las características técnicas a destacar: tiempo de enfriamiento: 2–4 h (dependiente de condiciones), temperatura final: 4–5 °C, velocidad del aire: 1–2 m/s, coeficiente de transferencia limitado por la configuración de carga

Las ventajas, son que es una tecnología ampliamente implantada, una baja inversión inicial (CAPEX), la facilidad de operación y mantenimiento, así como la integración sencilla en cámaras frigoríficas convencionales; por otro lado, las limitaciones son: un enfriamiento no uniforme en el interior de los palets, la dependencia del patrón de flujo de aire, un mayor tiempo de enfriamiento, y posibles pérdidas de calidad por deshidratación o enfriamiento lento.

1.3.2. Enfriamiento por vacío (vacuum cooling)

El enfriamiento por vacío se basa en la evaporación del agua contenida en el producto a baja presión. Al reducir la presión en una cámara estanca, el punto de ebullición del agua disminuye, provocando su evaporación a temperaturas bajas. Este proceso implica la absorción de calor latente, lo que produce un descenso rápido y uniforme de la temperatura del producto.

El principio de funcionamiento, bajo condiciones de vacío: el agua del producto evapora; cada 1% de pérdida de masa produce una reducción aproximada de 5–6 °C; el proceso es homogéneo en todo el volumen del producto.

Las características técnicas, se enumeran: tiempo de enfriamiento: 20–30 min, temperatura final: 2–4 °C, enfriamiento independiente del tamaño o embalaje, alta uniformidad térmica

Sin embargo, este sistema exige algunos requisitos constructivos; el sistema requiere una infraestructura específica, así no se trata de una cámara de paneles frigoríficos como en el caso anterior; aquí, la cámara estanca suele ser de acero inoxidable (AISI 304/316), o de acero galvanizado, o termo lacada. Se necesitan refuerzos estructurales para soportar presión externa, un sistema de sellado hermético. Bombas de vacío de alto rendimiento, y un sistema de condensación del vapor generado.

Las ventajas de este sistema son un enfriamiento extremadamente rápido, una alta uniformidad de temperatura, una mejora de la calidad y vida útil del producto, así como una reducción del riesgo microbiológico. Por otra parte, las limitaciones son: una alta inversión inicial (CAPEX elevado), una mayor complejidad técnica, el consumo energético es significativo comparado con el anterior, y una pérdida de masa del producto (≈1–3%)

1.3.3. Implicaciones en el diseño de la instalación

La elección del sistema de preenfriamiento condiciona de forma directa el volumen necesario de las cámaras frigoríficas, la potencia frigorífica instalada, el layout de la instalación y los materiales constructivos, como se ha indicado. Así, en sistemas de aire forzado, el diseño se basa en grandes volúmenes de aire y superficies de intercambio, mientras que en sistemas de vacío el dimensionamiento se centra en la capacidad de las cámaras estancas y en el rendimiento del sistema de vacío. Por tanto, la selección tecnológica no solo afecta al proceso térmico, sino también a la concepción global de la instalación industrial.

2. Objetivos

El objetivo general del estudio es dimensionar una instalación frigorífica capaz de procesar 60 toneladas diarias de lechuga garantizando la calidad del producto y la eficiencia energética.

Los objetivos específicos son:

- Analizar las alternativas tecnológicas de preenfriamiento.
- Dimensionar la carga térmica y la potencia frigorífica necesaria.
- Seleccionar los materiales constructivos óptimos para minimizar pérdidas térmicas.
- Evaluar comparativamente ambas soluciones desde un punto de vista técnico y operativo.

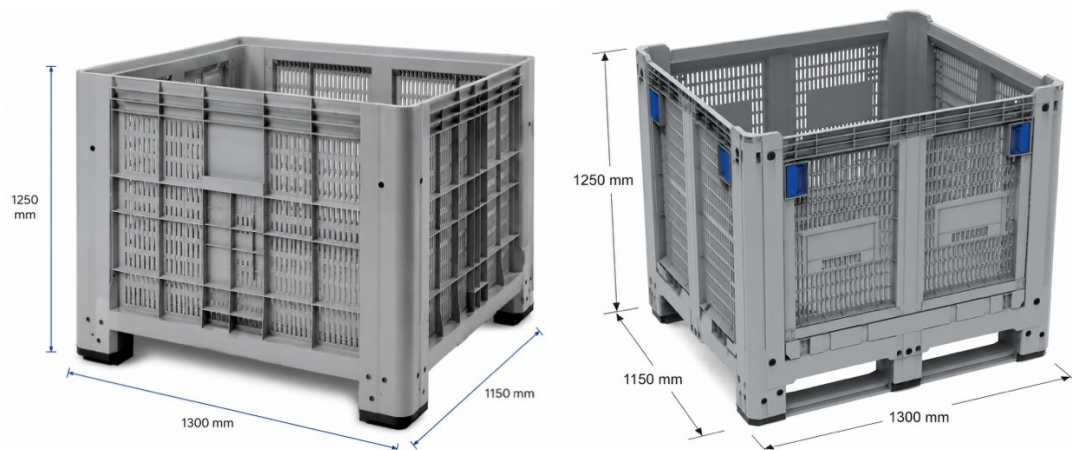
3. Metodología

Como se ha indicado, se parte de una capacidad de producción de 60 toneladas diarias, organizadas en dos ciclos de 30 toneladas. El proceso térmico se divide en dos etapas: la de pre-enfriamiento hasta 5 °C, y la de conservación entre 0–2 °C. Se adopta una densidad de estibaje de 100 kg/m³ (ASHRAE, 2022) y coeficientes de seguridad del 10–15%.

3.1 Distribución y Volumetría

Se parte de la unidad de carga (palet europeo) para definir las superficies. Se proyectan dos recintos, una cámara de pre-refrigeración y una cámara de Conservación.

Figura 2: Palet contenedor rejillado de 1300x1150x1250 mm



3.2 Parámetros de cálculo

A continuación, se muestran los resultados de la cámara de pre-refrigeración sometida a estudio en la tabla 2:

Tabla 2: Dimensionamiento de la cámara de pre-refrigeración

Configuración de estiba	2 alturas
Masa del producto (M)	30 toneladas
Densidad de estibaje (ρ)	100 kg/m ³ (ASHRAE, 2022)
Volumen teórico (V _{cámara})	300 m ³
Volumen con Seg. (10%)	330 m ³
Altura de la cámara (h)	6 m
Superficie en planta útil	55 m ²
Sup. con pasillos (15%)	63,25 m ²
Dimensiones estimadas	9 x 7 m
Nº Total de Palets	57 palets
Palets por nivel (suelo)	29 palets
Superficie envolvente (S)*	318 m ²

*Suma de superficies de paredes, suelo y techo.

A continuación, en la siguiente figura, se muestra la distribución de la cámara de refrigeración.

Figura 3: Sección tipo de cámara frigorífica



3.3 Elementos constructivos y diseño térmico de las cámaras frigoríficas

El diseño de los elementos constructivos de las cámaras frigoríficas constituye un aspecto crítico en el comportamiento térmico global de la instalación, al determinar tanto las pérdidas energéticas como la estabilidad de las condiciones de conservación del producto (con la excepción de vacuum cooling cuyo diseño es más una máquina que una estancia física); se indica en la figura 4, una representación del mismo.

Figura 4: Vacuum cooling



En este estudio, se ha realizado una selección de materiales aislantes y una definición de las soluciones constructivas en base a criterios de eficiencia térmica, resistencia a la humedad y viabilidad constructiva.

3.4 Selección del material aislante

Se ha llevado a cabo una comparativa entre los principales materiales aislantes utilizados en instalaciones frigoríficas: poliuretano (PUR/PIR), poliestireno extruido (XPS) y lana de roca.

Para determinar el cerramiento óptimo, se ha realizado una comparativa entre los tres materiales más usuales en la industria frigorífica, evaluando su conductividad térmica (λ) y comportamiento ante la humedad (higroscopicidad).

Tabla 3: Comparativa técnica de aislantes térmicos

Parámetro	Poliuretano (PUR/PIR)	Poliestireno Extruido (XPS)	Lana de Roca
Conductividad (λ) [W/mK]	0,023 - 0,028	0,033 - 0,035	0,040 - 0,045
Resistencia a difusión vapor (μ)	Alta (60-150)	Muy Alta (80-250)	Baja
Comportamiento ante agua	Impermeable	Impermeable	Absorbente (Riesgo)
Espesor eq. para mismo aislamiento	100% (Base)	~135%	~160%

3.5 Criterio de selección

La lana de roca presenta una conductividad térmica superior, lo que implica mayores espesores para igual prestación térmica, por lo que se descarta como solución óptima en este caso, comparada con el PUR/PIR. La intención de dicho material, se corresponde con la necesidad de establecer una solución firme para reducir la carga de fuego de los locales y su vinculación con los seguros de responsabilidad en caso de incendio. Es por ello que últimamente se tienen en consideración como elemento constructivo en la instalación de cubiertas para colocación de placas fotovoltaicas, e incluso, como compartimentaciones

interiores no sólo de sectorizaciones, sino también de salas y cámaras frigoríficas. Desde el punto de vista analítico, la intención de reflejarlo no concuerda con el espíritu de conseguir un espesor mínimo a considerar en una cámara.

Así, se selecciona el poliuretano (PUR/PIR) en formato panel sándwich se basa en una menor conductividad térmica, una optimización del espesor necesario, lo que implica, mayor volumen útil, elevada resistencia a la difusión de vapor y un comportamiento impermeable, clave en productos hortofrutícolas con alta humedad.

3.6 Modelo de cálculo térmico

El coeficiente global de transmisión de calor se determina mediante:

$$U = 1 / (1/\alpha_{int} + \Sigma e/\lambda + 1/\alpha_{ext}) \quad (1)$$

Donde:

U: es el coeficiente global de transmisión, e indica cuántos vatios de calor atraviesan cada m² por cada grado de diferencia de temperatura (W/m²K).

α_{int} : es el coeficiente de convección interior, e indica la resistencia del aire en contacto con la cara interna de la pared.

α_{ext} : es el coeficiente de convección exterior, e indica la resistencia del aire (viento, corrientes) en la cara externa de la pared.

Como ejemplo representativo, para un panel sándwich con aislamiento PUR de 100 mm de espesor y una conductividad térmica $\lambda = 0,025$ W/mK, se obtiene una resistencia térmica aproximada de: $R = 0,10/0,025 = 4,0$ m²K/W

Considerando las resistencias superficiales interior y exterior, la transmitancia térmica resultante es aproximadamente:

$U \cong 0,24$ W/m²K; valor coherente con instalaciones frigoríficas industriales de temperatura positiva.

La densidad de flujo térmico, es decir, la "cantidad" de calor que realmente se está perdiendo o ganando a través de la superficie. viene dada por la siguiente expresión:

$$j = U \cdot \Delta T \quad (2)$$

Donde:

U: transmitancia térmica (W/m²·K)

j: flujo térmico (W/m²)

ΔT : diferencia de temperatura

Se adopta como valor de diseño: $j \approx 8$ W/m² (valor típico en cámaras frigoríficas industriales de temperatura positiva)

4. Resultados

4.1 Solución constructiva de cámara de preenfriamiento

El sistema de vacuum cooling presenta una configuración constructiva específica basada en cámaras estancas reforzadas para soportar condiciones de subpresión. Para las cámaras convencionales de aire forzado, se consideran las siguientes soluciones constructivas:

Para la envolvente vertical: paredes. Se parte del supuesto de que el perímetro exterior de la nave, se protege con una pared o de prefabricado de hormigón, chapa lacada/galvanizada, o panel sándwich de al menos 45mm. Configuración tipo: aislamiento PUR, o PIR; con acabado interior de chapa de acero lacado de 0.5mm de espesor, siendo el espesor de aislamiento resultante mínimo de 80 mm, siendo recomendable 100mm. Para el techo; se indica el mismo material: panel sándwich con aislamiento PUR, o PIR; espesor mínimo: 100 mm, siendo recomendable 120mm. El suelo, debe disponer de una solución multicapa: hormigón armado de solera, aislamiento PUR, y opcionalmente poliestireno, barrera de vapor, pre-solera de 10 mm; siendo el espesor de aislamiento resultante mínimo de 30 mm, siendo recomendable 40mm.

4.2 Solución constructiva de cámara de conservación

Esta cámara, opera a temperaturas más bajas (0–2 °C), y aunque aparentemente se requiere mayor aislamiento, el resultado óptimo es el mismo ya calculado.

4.3 Relación con el sistema de preenfriamiento

El diseño constructivo presenta implicaciones directas según la tecnología utilizada. Para el aire forzado; se necesita mayor volumen de aire, mayor superficie de intercambio, más sensibilidad a infiltraciones y, necesidad de distribución homogénea. Para el Vacuum cooling, se necesita una cámara estanca, con un diseño completamente distinto, de estructura metálica reforzada y no depende del aislamiento tradicional. El sistema de aire forzado se integra fácilmente en instalaciones frigoríficas convencionales, utilizando paneles sándwich y equipos estándar. Así, el sistema de vacío requiere una infraestructura que incluye cámaras estancas de acero reforzado, sistemas de sellado y equipos de vacío, lo que incrementa significativamente la complejidad del diseño. Asimismo, el mantenimiento y operación del sistema de vacío requieren personal especializado, lo que puede suponer una limitación en determinadas instalaciones.

4.4 Dimensionamiento del sistema de preenfriamiento

Cada ciclo corresponde a un lote independiente, permitiendo que uno se encuentre en fase de preenfriamiento mientras el otro se mantiene en conservación. Se analizan de forma independiente las dos tecnologías consideradas: preenfriamiento mediante aire forzado y enfriamiento por vacío.

4.5 Dimensionamiento del sistema de aire forzado

Se necesita evaluar la carga térmica asociada al enfriamiento del producto se calcula mediante:

$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$; donde: $m = 30.000 \text{ kg}$, $c_p \approx 3,7 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ (valor típico para productos hortofrutícolas de elevado contenido en agua según ASHRAE, 2022), y $\Delta T = 25-5 = 20 \text{ K}$, considerando una temperatura inicial de campo representativa de condiciones estivales en la Región de Murcia.

Así, la potencia frigorífica requerida, para un tiempo de enfriamiento de 3 horas:

$$P = 2.220.000 / 3 \cdot 3600 \approx 205,6 \text{ kW}$$

Aplicando un margen del 20% (pérdidas, infiltraciones, ineficiencias): $P_{\text{instalada}} \approx 250 \text{ kW}$

Para una densidad de estibaje de: $\rho \approx 100 \text{ kg/m}^3$, $V = 10030.000 = 300 \text{ m}^3$

Considerando espacios de circulación y aire:

$$V_{\text{total}} \approx 400 \text{ m}^3$$

La superficie de cámara, con una altura útil de 5 m:

$$S=400/5=80 \text{ m}^2$$

El caudal de aire, para garantizar transferencia térmica adecuada: Renovaciones: 60–100 vol/h

$$V' \approx 400 \cdot 80 = 32.000 \text{ m}^3/\text{h}$$

4.6 Dimensionamiento del sistema de vacuum cooling

El enfriamiento se produce por evaporación del agua, el calor latente del agua: $L_v \approx 2.400 \text{ kJ/kg}$

Para eliminar: $Q=2.220.000 \text{ kJ}$, $m_{\text{agua}}=Q/L_v \approx 925 \text{ kg}$

Esto implica:

$$925/30.000 \approx 3,1\% \text{ pérdida de masa}$$

Coherente con valores reales (1–3%)

El tiempo de proceso

20–30 minutos por ciclo

Se adopta: 30 min

Para la capacidad de cámara, el volumen viene determinado por la carga: $V \approx 300\text{--}350 \text{ m}^3$

Similar al sistema anterior, pero: sin necesidad de sobredimensionar por flujo de aire. Los requisitos de vacío necesarios para la evaporación del agua a temperaturas próximas a 5 °C se estiman en presiones del orden de 6–10 mbar.

El sistema de vacío, debe garantizar: rápida evacuación de aire, mantenimiento del nivel de vacío, extracción de vapor. Eso incluye: bombas de vacío, condensador, intercambiador.

La potencia estimada, que debe de incluir la energía de vacío, y la condensación, se estima:

$$P \approx 100\text{--}150 \text{ kW}$$

4.7 Comparativa técnica de dimensionamiento

En la siguiente tabla, se aprecia una comparativa entre el sistema de aire forzado y vacuum cooling:

Tabla 4: Comparativa sistema de aire forzado y vacuum cooling

Parámetro	Aire forzado	Vacuum cooling
Masa por ciclo	30 t	30 t
Tiempo enfriamiento	3 h	30 min
Potencia instalada	~250 kW	~120 kW
Volumen cámara	400 m ³	300–350 m ³
Homogeneidad	Media	Alta
Pérdida de masa	Baja	1–3 %
Complejidad	Baja	Alta

El sistema de aire forzado presenta mayores tiempos de enfriamiento y mayor volumen de diseño, mientras que el sistema de vacuum cooling destaca por su elevada rapidez y uniformidad térmica, a costa de una mayor complejidad técnica.

4.8 Discusión energética de las cargas térmicas

El análisis de cargas térmicas pone de manifiesto que la carga asociada al enfriamiento del producto constituye el componente dominante del balance energético de la instalación, representando aproximadamente el 75–80% de la demanda térmica total durante el proceso de preenfriamiento.

Este comportamiento resulta coherente con instalaciones de abatimiento rápido para productos hortofrutícolas de elevada tasa respiratoria, donde la eliminación del calor sensible del producto adquiere mayor relevancia que las cargas por transmisión térmica o infiltraciones.

A diferencia de las cámaras frigoríficas de conservación convencionales, en las instalaciones de preenfriamiento rápido la potencia frigorífica instalada debe dimensionarse para absorber elevadas cargas térmicas en periodos de tiempo reducidos. Esto implica un cierto sobredimensionamiento de potencia respecto a instalaciones de almacenamiento estático, aunque plenamente justificado desde el punto de vista de conservación de calidad y reducción de pérdidas postcosecha.

4.9 Comparación del rendimiento térmico

El sistema de vacuum cooling presenta una clara ventaja en términos de velocidad de enfriamiento, reduciendo el tiempo de proceso de aproximadamente 3 horas en sistemas de aire forzado a menos de 30 minutos. Esta diferencia se debe al cambio de mecanismo de transferencia de calor, pasando de un proceso limitado por convección y conducción a un proceso dominado por la evaporación del agua interna del producto.

Esta característica resulta relevante en productos como la lechuga, donde la rápida eliminación del calor de campo reduce significativamente la tasa respiratoria y, por tanto, la degradación del producto.

Por el contrario, el sistema de aire forzado presenta limitaciones sobre la distribución del flujo de aire, lo que puede generar gradientes térmicos dentro de los palets y un enfriamiento no uniforme.

4.10 Impacto en la calidad del producto y consideraciones económicas

El factor diferencial más relevante entre ambas tecnologías se subraya en la calidad final del producto. El enfriamiento rápido y homogéneo proporcionado por el vacuum cooling permite: reducir la pérdida de turgencia, minimizar la proliferación microbiana, prolongar la vida útil. Sin embargo, este proceso implica una pérdida de masa del orden del 1–3%, que debe ser considerada desde el punto de vista económico.

En sistemas de aire forzado, aunque la pérdida de masa es menor, el mayor tiempo de exposición a temperaturas elevadas puede afectar negativamente a la calidad del producto.

El sistema de vacuum cooling presenta una inversión inicial significativamente superior debido a la necesidad de cámaras estancas reforzadas, bombas de vacío de alto rendimiento y sistemas específicos de condensación y extracción de vapor. Por el contrario, el sistema de aire forzado emplea tecnologías ampliamente implantadas en instalaciones frigoríficas convencionales, lo que reduce tanto el coste inicial como la complejidad de mantenimiento.

No obstante, en instalaciones de elevada capacidad o destinadas a mercados con elevados requisitos de calidad y vida útil del producto, la inversión asociada al vacuum cooling puede justificarse mediante la reducción de mermas postcosecha, la mejora de la calidad comercial y la disminución del tiempo de permanencia del producto en proceso. En consecuencia, la selección tecnológica debe contemplar no solo criterios térmicos y energéticos, sino también factores económicos, logísticos y comerciales.

4.11 Criterios de selección tecnológica

A partir del análisis realizado, la elección del sistema de preenfriamiento debe basarse en los siguientes criterios:

- **Volumen de producción:** altos volúmenes favorecen sistemas de vacío
- **Valor del producto:** productos de alto valor justifican mayor inversión
- **Requisitos de calidad:** mercados exigentes requieren enfriamiento rápido
- **Capacidad de inversión:** el *vacuum cooling* presenta mayor CAPEX
- **Complejidad operativa:** sistemas convencionales son más robustos

Por tanto, el sistema de aire forzado constituye una solución adecuada para instalaciones de menor complejidad o menor exigencia de calidad, mientras que el *vacuum cooling* sería la solución óptima para instalaciones de alta capacidad y productos con alto valor añadido.

5. Conclusiones

El presente estudio ha abordado el análisis y dimensionamiento de dos tecnologías de preenfriamiento aplicables a una instalación de procesamiento de 60 toneladas diarias de lechuga, considerando un esquema operativo en dos ciclos diarios.

Los resultados obtenidos permiten establecer las siguientes conclusiones:

En primer lugar, el sistema de preenfriamiento mediante aire forzado, el más generalizado, constituye una solución viable y probada, caracterizada por su menor complejidad constructiva y operativa.

El sistema de enfriamiento por vacío (*vacuum cooling*) permite una reducción drástica del tiempo de enfriamiento, alcanzando condiciones óptimas en menos de 30 minutos. Este comportamiento se traduce en una mejora de la calidad del producto, al reducir la tasa respiratoria y prolongar su vida útil.

Desde el punto de vista energético, ambos sistemas presentan diferencias en la distribución del consumo, siendo el sistema de aire forzado más intensivo en tiempo, mientras que el sistema de vacío concentra el consumo en intervalos cortos asociados al proceso de evaporación y generación de vacío.

La elección del sistema óptimo depende de factores como el volumen de producción, el nivel de calidad requerido, la capacidad de inversión y la complejidad operativa asumible.

Los resultados obtenidos evidencian que la selección del sistema de preenfriamiento no constituye únicamente una decisión tecnológica, sino una variable estratégica que condiciona de forma directa la calidad del producto, la eficiencia energética y la competitividad de la instalación agroindustrial

El diseño propuesto se alinea con las exigencias de eficiencia energética del CTE DB-HE y los estándares de seguridad del RSIF. Además, la instalación contribuye directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente al ODS 9 (Industria e Innovación) y al ODS 12 (Producción y Consumo Responsables) al reducir el desperdicio alimentario mediante una cadena de frío robusta.

6. Referencias

ASHRAE. (2022). *ASHRAE Handbook—Refrigeration (SI Edition)*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Dossat, R. J. (2000). *Principios de refrigeración* (1.^a ed.). Compañía Editorial Continental.

International Institute of Refrigeration. (2021). *The role of refrigeration in the global economy*

(38th Note on Refrigeration Technologies).

Ministerio de Fomento. (2019). *Código Técnico de la Edificación: Documento Básico HE: Ahorro de Energía. Gobierno de España.*

Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. (2019). *Real Decreto 552/2019, de 27 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas y sus instrucciones técnicas complementarias. Boletín Oficial del Estado, (257).* <https://www.boe.es/eli/es/rd/2019/09/27/552>

Torrella Alcaraz, E. (2014). *La producción de frío aplicada a la conservación de alimentos. Universidad Politécnica de Valencia.*

Andrés, M. I. de, & Rodríguez Pomatta. (UNED). *Tablas y diagramas de ingeniería térmica. [Referencia complementaria adjunta a Torrella Alcaraz].*

Kerzner, H. (2017). Project Management Metrics, KPIs, and Dashboards. In *Project Management Metrics, KPIs, and Dashboards* (Third edit). John Wiley & Sons, Incorporated. <https://doi.org/10.1002/9781119427599>

Utilización de inteligencia artificial generativa

Para la elaboración de este trabajo se ha utilizado inteligencia artificial generativa como apoyo en la revisión del trabajo.

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible
ODS 12: Producción y Consumo
Responsables**

