

Introducción de refrigerantes con bajo o nulo potencial de calentamiento atmosférico en la producción y exportación de alimentos procesados (frutas y hortalizas) en Chile.



PROYECTO DE DISEÑO DE CONVERSIÓN PARA EMPRESA CON CÁMARAS FRIGORÍFICAS DE TEMPERATURA NEGATIVA QUE FUNCIONAN CON HCFC O HFC

ANEXO: DISEÑO PARA NUEVO TÚNEL DE CONGELACIÓN

Albert Albert | Consultor Experto en Refrigeración | Marzo 2018

Contacto: albertalbertsoto@gmail.com

Promovido por:



ANEXO: Proyecto de nuevo Túnel de congelación.

Índice del documento:

1.- Objeto del proyecto.....	3
2.- Información disponible sobre el nuevo túnel de congelación.	4
3.- Propuesta de conversión de la instalación frigorífica.	4
3.1.- Alternativas posibles para el diseño de conversión.....	4
3.2.- Descripción de la solución escogida.	5
4.- Especificaciones técnicas de la nueva instalación.....	7
4.1.- Central frigorífica.	7
4.1.1.- Generalidades.....	7
4.1.2.- Descripción de la Central frigorífica.	8
4.2. Gas Cooler.	9
4.2.1. Generalidades.	9
4.2.2. Descripción del Gas cooler.....	10
4.2.3. Descripción del sistema de apoyo adiabático.	11
4.3. Evaporador del Túnel.	11
4.3.1. Generalidades.	11
4.4. Separador de aspiración + bombas de refrigerante CO ₂	12
4.5. Valvulería.	13
4.6. Control	13
4.7. Tubería y accesorios. Soldadura.....	14
4.8. Aislamiento térmico.....	15
4.9. Seguridad	15
5.- Evaluación del consumo energético anual de la instalación propuesta.	17
5.1.- Metodología de cálculo.	17
5.2.- Resultado de los cálculos.	19
6.- Estimaciones de las emisiones de CO ₂ -eq directas e indirectas de la instalación propuesta.	20
6.1.- Cálculo del TEWI para la instalación propuesta.	20
7.- Estimación del capital y coste de operación de la instalación propuesta.	21

8.- Conclusiones.....	22
------------------------------	-----------

Índice de figuras

Figura 1: Esquema de principio de la solución escogida para el túnel de congelación (Sistema Booster transcrito de CO ₂ sobrealimentado con apoyo de enfriamiento adiabático)	6
---	---

Índice de tablas

Tabla 1: Comparativa de COP a distintas temperaturas ambiente	5
Tabla 2: Temperaturas medias seca y húmeda por mes	17
Tabla 3: Porcentaje de funcionamiento de la instalación por mes	18
Tabla 4: Instalación propuesta. Consumos energéticos por mes	19
Tabla 5: Energía consumida anual por la instalación propuesta (estimación)	19

Índice de fotografías

Foto 1: Central frigorífica booster transcrito para CO ₂	9
Foto 2: Gas Cooler	10
Foto 3: Sistema de apoyo adiabático	11
Foto 4: Controlador Danfoss AK-PC-781A	13
Foto 5: Controlador Danfoss AK-CC-550A	13

1.- Objetivo del proyecto.

El presente diseño para un nuevo túnel de congelación se enmarca dentro del Proyecto de “Introducción de refrigerantes con bajo o nulo potencial de calentamiento atmosférico en la producción y exportación de alimentos procesados (frutas y hortalizas)” en Chile, promovido por el CTCN y ONUDI.

El objetivo del presente proyecto, focalizado en el sector de proceso de fruta y hortalizas en Chile, es demostrar la eficacia y la mayor eficiencia energética de los sistemas de refrigeración funcionando con refrigerantes con bajo o nulo potencial de calentamiento global (GWP), e incentivar su uso entre las empresas de este sector.

Este diseño es un anexo al diseño de conversión realizado para un caso representativo de empresa chilena de proceso de fruta (en concreto *berries*) congelada, donde los sistemas frigoríficos funcionan con HCFC o HFC y dispone de cámaras de temperatura positiva, pero también de abundantes cámaras de temperatura negativa, así como de túneles de congelación.

Este anexo recoge el proyecto para un nuevo túnel de congelación que la empresa tiene en estudio como próxima inversión para la ampliación de sus instalaciones.

La Reglamentación chilena sobre refrigerantes se basa en la Ley 20.096/2006 (Ley Ozono), el Decreto Supremo 75/2012 MINSEGPRES y las Normas Chilenas NCh3241:2017 “Sistemas de refrigeración y climatización – Buenas prácticas para el diseño, armado, instalación y mantención” y NCh3301:2017 “Sistemas de refrigeración y climatización – Buenas prácticas para la instalación y mantención de sistemas que utilizan refrigerantes inflamables”, así como en la aplicación de la revisión de 2007 del Protocolo de Montreal.

Como país enmarcado en el Artículo 5 de dicho Protocolo, Chile tiene vigente un calendario de reducción de consumo y eliminación de los HCFC que finaliza en el 2030 (con un 2,5% permitido para mantenimiento hasta 2040) y de reducción de consumo de HFC, que llevará a una disminución de un 80% en 2045 sobre el consumo base 2020-2022.

El uso de refrigerantes con bajo o nulo potencial de calentamiento global previene un posterior incremento de los sistemas basados en HFC y, por tanto, ayuda al cumplimiento de los compromisos de Chile con el Protocolo de Montreal y, además, reduce el impacto del sector de proceso de fruta y hortaliza en el cambio climático.

Entre dichos refrigerantes con nulo o bajo GWP, que han sido desarrollados en los últimos años y cuya tecnología ya está disponible en el mercado, se identifican refrigerantes naturales, como el amoníaco, los hidrocarburos y el CO₂, y otras soluciones como las hidrofluoroolefinas (HFO).

2.- Información disponible sobre el nuevo túnel de congelación.

La empresa se dedica al proceso de frutos del bosque (*berries*) orgánicos de todo tipo: arándanos (*blueberries*), frambuesas (*raspberries*), moras (*blackberries*) y frutillas (*strawberries*), tanto frescos como congelados para, principalmente, el mercado de la exportación.

La empresa está estudiando la posibilidad de invertir en la ampliación de sus instalaciones con un nuevo Túnel de congelación que complemente los 2 túneles existentes, cuya conversión ya se ha estudiado en el Proyecto de conversión principal y del cual este proyecto es un anexo.

Los datos facilitados por la empresa sobre el nuevo túnel son:

- **Capacidad de congelación: 2900 kg/h**
- **Potencia frigorífica: 429 kW a -40°C**
- **Tipo Túnel: IQF de lecho fluidizado.**

3.- Propuesta de conversión de la instalación frigorífica.

3.1.- Alternativas posibles para el diseño de conversión.

Inicialmente, los refrigerantes a considerar para este proyecto son el NH_3 y el CO_2 .

Ambos son buenos candidatos al diseño de conversión por su condición de gases de nulo o bajo GWP, por su adecuación a las potencias necesarias en este proyecto y los COP que se obtienen.

Tras un análisis más detallado para el caso concreto de este proyecto, la elección se decanta al CO_2 , por los siguientes motivos:

- El mejor COP media anual que presenta esta solución respecto del amoníaco.
- La clasificación de seguridad A1 del CO_2 , por B2 del NH_3 , lo hace más seguro para este proyecto: por un lado, para las personas que trabajan en la planta y, por otro, para el producto, que podría echarse a perder en caso de fuga de amoníaco. Estos aspectos se recogen en la “Guía de uso y manejo del amoníaco” editada por ASOEX (Asociación de exportadores de frutas de Chile).

Dentro de las tecnologías de CO_2 existentes en el mercado, se escoge la tecnología de CO_2 transcrito, ya que es una tecnología que utiliza sólo CO_2 , no necesita de otra instalación frigorífica para condensarlo (que habitualmente

funciona con refrigerantes sintéticos), como ocurre con la tecnología de CO₂ subcrítico.

El sistema comercial básico de la tecnología de CO₂ transcrito para baja temperatura es el sistema Booster con baipás de flash-gas.

En la aplicación de túnel de congelación, esta tecnología es totalmente adecuada, dado que se puede escoger la presión intermedia del sistema Booster de tal forma que el COP se optimiza. En este caso la presión intermedia se situará a una temperatura saturada de 0°C.

Para este proyecto se han considerado y analizado dos sistemas:

- Sistema con CO₂ en booster transcrito con baipás de flash-gas y enfriamiento adiabático

- Sistema con NH₃ con compresores de tornillo con economización y condensación evaporativa.

Se ha realizado un análisis de costos-beneficios para determinar cuál de las 2 variantes era más adecuada.

Se ha realizado una comparativa energética para temperaturas ambiente de 20°C y 28°C, que se recoge en la tabla 1:

Tabla 1: Comparativa de COP a distintas temperaturas ambiente.

COP Total		
Tª ambiente	Sistema CO ₂	Sistema NH ₃
20°C	1,52	1,49
28°C	1,39	1,39

Fuente: elaboración propia

Con los datos calculados, se escoge **el sistema con CO₂ en booster transcrito con baipás de flash-gas y apoyo de enfriamiento adiabático.**

3.2.- Descripción de la solución escogida.

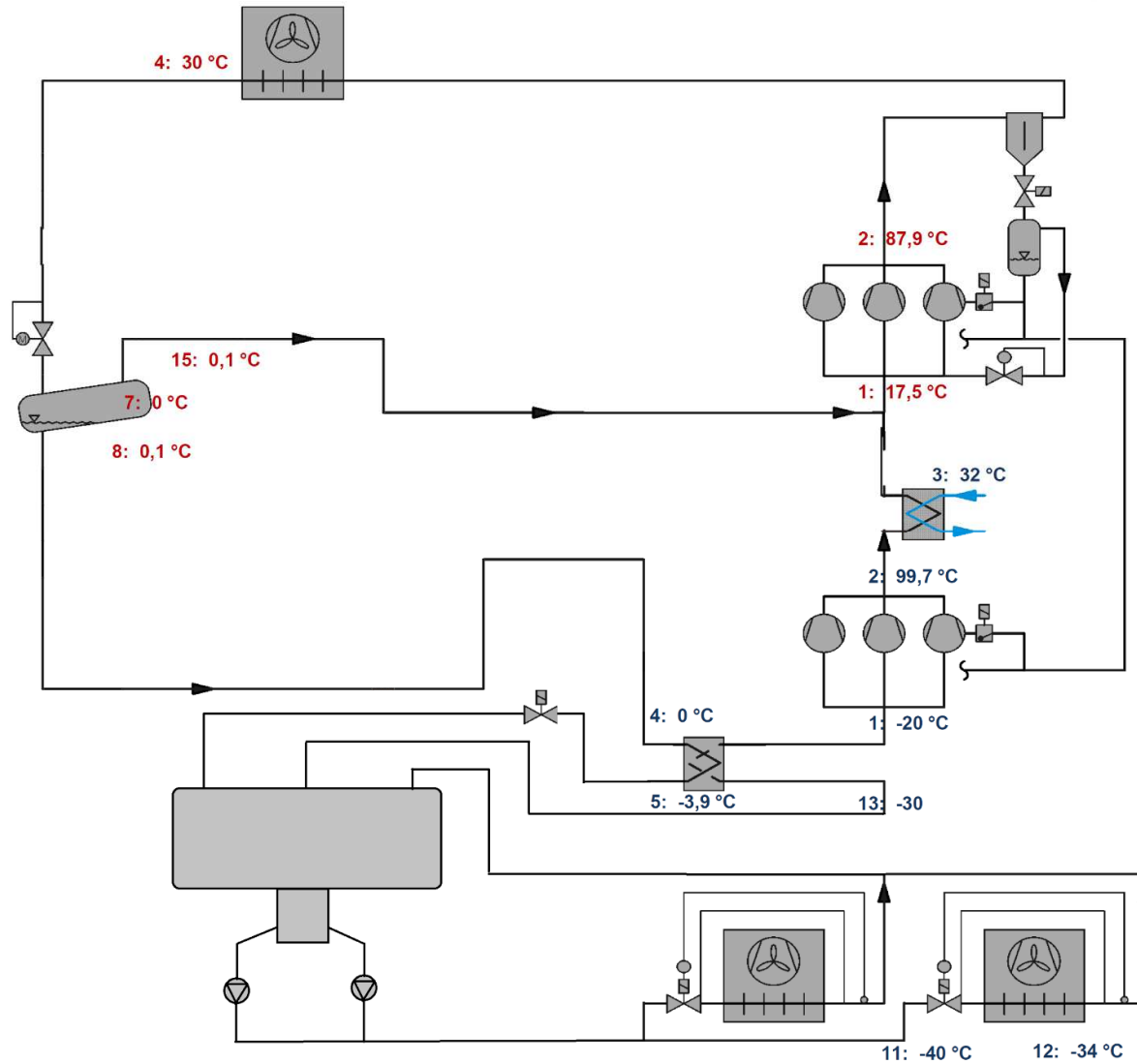
Así pues, el sistema escogido para la conversión de la instalación es un Sistema Booster Transcrito de CO₂ con baipás de flash-gas y apoyo de enfriamiento adiabático.

En este caso, se necesita un sólo nivel de temperatura de evaporación: -40°C.

El evaporador del túnel de congelación será sobrealimentado por bombas de refrigerante CO₂.

El esquema de principio de la instalación escogida es el siguiente (fig. 1):

Figura 1: Esquema de principio de la solución escogida para la nuevo túnel de congelación (Sistema Booster Transcrítico de CO2 sobrealimentado con apoyo de enfriamiento adiabático).



Fuente: Bitzer

4.- Especificaciones técnicas de la nueva instalación.

A continuación, se detallan las especificaciones técnicas de la nueva instalación diseñada con CO₂, concretamente de los siguientes elementos:

- Centrales frigoríficas
- Gas coolers
- Evaporadores
- Separador de aspiración + bombas
- Valvulería
- Control
- Tubería y accesorios. Soldadura.
- Aislamiento
- Seguridad

4.1.- Central frigorífica.

4.1.1.- Generalidades.

La central frigorífica de transcrito propuesta tiene cuatro zonas con presiones diferenciadas, cada una de ellas se diseña con una presión máxima de servicio (PS) distinta, acorde con las necesidades.

Presiones de diseño escogidas:

- Presión del sector de alta presión: 120 bar
- Presión del sector recipiente intermedio y líneas de líquido: 90 bar
- Presión del sector aspiración de los compresores de baja Tº: 28 bar
- Presión del sector aspiración de los compresores de media Tº: 52 bar

Todos los materiales frigoríficos utilizados deberán tener una presión máxima de servicio, declarada por el fabricante, igual o superior a la presión de diseño escogida para el sector en el cual se encuentren instalados.

El material escogido para las tuberías de las centrales es el acero inoxidable AISI 304. En el sector de PS=120 bar será del tipo Schedule 40, mientras que en el resto de sectores será del tipo Schedule 10.

Como alternativa también podrá utilizarse la aleación de cobre de alta resistencia CuFe2P (conocida también como K65, nombre comercial de la marca Wieland).

Los recipientes de líquido, líneas de líquido y aspiración se suministrarán aisladas con espuma elastomérica, tipo Armaflex o similar, de espesor adecuado para las temperaturas de trabajo.

4.1.2.- Descripción de la Central frigorífica.

La central frigorífica dispondrá de los siguientes elementos principales:

- Compresores para Media Temperatura (0°C):

- 4 compresores marca Bitzer modelo 6DTE-50K o similar + 1 compresor 4FTC-30K con variador de frecuencia externo (25 a 70 Hz).

- Compresores para Túnel de congelados (-40°C):

- 7 compresores marca Bitzer modelo 4NSL-30K o similar, uno de ellos equipado con variador de frecuencia externo (25 a 70 Hz).

- Accesorios para los compresores:

- Presostatos de alta y baja para cada compresor
- Resistencias de cárter para cada compresor

- Sistema de separación de aceite de alta presión con:

- 2 Separadores tipo coalescente marca ESK con control de nivel
- Controles de nivel de aceite electrónicos KRIWAN en cada compresor

- Sistema de expansión transcrítico con:

- Válvula motorizada de expansión transcrítica DANFOSS CCMT
- Válvula motorizada igual a la anterior como back-up.

- Recipiente intermedio:

- 2 Recipientes de líquido de 450 lts cada uno, conectados en paralelo.
- 2 Válvulas motorizadas de baipás de flash-gas DANFOSS CCMT.
- 1 Válvula motorizada igual a una de las anteriores como back-up.

- Línea de líquido:

- Intercambiador a placas, marca SWEP, como subenfriador de línea de líquido general y recalentador de gases para la aspiración de baja temperatura.
- Llave de líquido marca DANFOSS para el túnel de congelación

- Aspiración de media temperatura:

- Inyección de líquido para control de recalentamiento excesivo
- Inyección de vapor para control de recalentamiento insuficiente

- Aspiraciones de túnel:

- Recalentador de gases de aspiración (ya descrito en línea de líquido)
- Llave de aspiración marca DANFOSS desde túnel.

- Panel de control:

- Transductores de presión de alta y baja en todos los sectores
- Sondas de temperatura
- Manómetros de presión de alta y baja en todos los sectores.

Foto 1: Central Booster Transcrítico para CO₂



Fuente: Pecomark

4.2. Gas Cooler.

4.2.1. Generalidades.

El gas cooler para este proyecto dispondrá de una presión máxima de servicio mínima de 120 bar.

Los materiales de construcción podrán ser cobre de alta resistencia, aleación CuFe2P o acero inoxidable AISI 304.

Los ventiladores del gas cooler serán del tipo EC (electrónicamente conmutados) que permiten la variación de su velocidad de 0-100%.

El gas cooler dispondrá de un sistema de apoyo para enfriamiento adiabático mediante spray de agua. Dicho sistema de enfriamiento se pondrá en marcha sólo con temperaturas ambientes superiores a 20°C

Para la selección del gas cooler se considerará:

- En funcionamiento transcrito, una diferencia de temperatura entre temperatura de entrada de aire y temperatura de salida de CO₂ del gas cooler máxima de 2K a una temperatura ambiente de 33°C (sin apoyo adiabático)
- Con la selección realizada en las condiciones de transcrito indicadas, se comprobará que, en funcionamiento subcrítico, por tanto, como condensador, se consigue una diferencia de temperatura inferior a 8 K entre la temperatura de entrada de aire y la temperatura de condensación, a temperatura ambiente de 12°C.

4.2.2. Descripción del Gas cooler.

El gas cooler tiene las siguientes características:

Potencia de disipar: 650 kW a Tamb=33°C y DT=2 K en transcrito

Marca y modelo: ECO KCE 98G6 G722 o similar

Área de intercambio exterior: 1490 m²

Nº ventiladores: 8 de diámetro 900 mm

Caudal de aire: 192.000 m³/h

Potencia de los ventiladores (total): 20,8 kW

Dimensiones: 6290 x 2393 x 1386 (H) mm

Foto 2: Gas Cooler



Fuente: ECO Modine

4.2.3. Descripción del sistema de apoyo adiabático.

El sistema de apoyo adiabático, del tipo por nebulización de agua, para el gas cooler tiene las siguientes características:

Marca: CAREL CHILLBOOSTER

Estación de bombeo de agua de 1.000 lts/h: con suministro de agua a 10 bar al sistema de distribución, controlador de caudal todo/nada, válvula térmica de protección de alta temperatura, electroválvula de drenaje para parada de máquina.

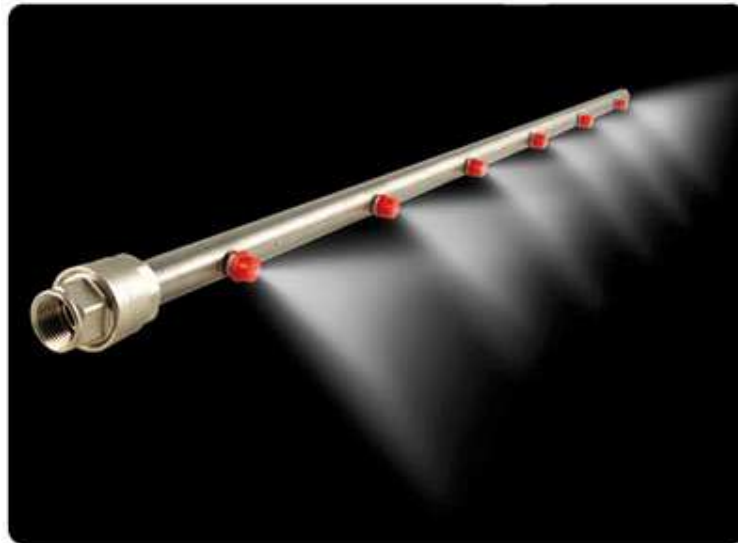
Colectores de distribución de agua: en acero inoxidable

Boquillas nebulizadoras

Electroválvula de drenaje del sistema de distribución

Mangueras de conexión y racores de metal

Foto 3: Sistema de apoyo adiabático



Fuente: CAREL

4.3. Evaporador del Túnel.

4.3.1. Generalidades.

El evaporador para el túnel será suministrado por el fabricante del túnel de congelación IQF de lecho fluidizado y deberá estar diseñado específicamente para el funcionamiento con CO₂. Será del tipo de batería de tubos y aletas ventilada.

La presión máxima de funcionamiento (PS) mínima, declarada por el fabricante, deberá ser de 60 bar.

El material de fabricación de los tubos del evaporador será cobre de alta resistencia, CuFe2P (K65) o acero inoxidable AISI 304. Las aletas serán de aluminio.

El evaporador del túnel estará diseñado para funcionar sobrealimentado, con una tasa de recirculación mínima de 1.5

El desescarche del evaporador será por resistencias eléctricas.

La separación mínima de aletas del evaporador será de 10 mm:

4.4. Separador de aspiración + bombas de refrigerante CO₂.

El sistema diseñado corresponde a un sistema con sobrealimentación de líquido refrigerante al evaporador.

Esta configuración es la que permite obtener un mejor rendimiento frigorífico en los evaporadores para túneles de congelación, ya que mejora el aprovechamiento de todos los tubos del evaporador y permite obtener una menor diferencia entre la temperatura de evaporación del refrigerante y la temperatura ambiente en el interior del túnel de congelación.

Este diseño hace necesario un separador de aspiración, que realiza las siguientes funciones:

- Separar el refrigerante líquido del vapor.
- Enviar sólo refrigerante vapor a la aspiración de los compresores
- Alimentar las bombas de refrigerante con CO₂ líquido.
- Garantizar una columna de líquido suficiente a la succión de la bombas de refrigerante para evitar que éstas caviten.

El separador de aspiración deberá tener una presión de funcionamiento (PS) mínima de 40 bar.

Las características del separador y sus accesorios serán los siguientes:

- Separador de aspiración de diámetro 900 mm x 3600 mm de longitud.
- Columna de nivel de líquido con niveles de trabajo y máxima capacidad
- 2 bombas de refrigerante CO₂ marca Hermetic o similar (una en stand-by)
- Presostatos diferenciales por bomba.
- Sistema de orificios de Q_{max} y Q_{min} para cada bomba.
- Sistema de inyección de refrigerante líquido CO₂ al separador con válvula solenoide y de expansión manual. El sistema de inyección estará duplicado para situaciones de emergencia.
- Sistema de retorno de aceite automático hacia los compresores

- Válvula de bola motorizada en la línea de aspiración seca para aislamiento del separador.
- Intercambiador a placas para unidad condensadora de emergencia permitiendo mantener el control de la presión del separador en tiempos de parada.
- Válvula de seguridad doble.

4.5. Valvulería.

Para el evaporador, se considera la siguiente valvulería necesaria:

- Una llave de cierre en la línea de líquido.
- Una válvula de expansión manual, tipo REG de Danfoss o similar
- Una válvula de retención (*check valve*) en la salida (aspiración) de cada evaporador. Esta válvula está destinada a limitar la cantidad de CO₂ que podría liberarse a cada cámara en caso de fuga de refrigerante en una de ellas.
- Una llave de cierre en la línea de aspiración
- También se dispondrán llaves de ¼" de servicio para vaciado de cada tramo aislable por válvulas, evitando de este modo que pueda quedar CO₂ atrapado en caso de labores de mantenimiento.

Las válvulas utilizadas deberán cumplir con la presión máxima de servicio del tramo en el que están instaladas.

4.6. Control

Para el control de cada central Booster de CO₂ transcrito se dispondrá de los siguientes controladores electrónicos de marca Danfoss:

- 1 controlador AK-PC-781A para control de los compresores de positiva, ventiladores de gas cooler, válvula de expansión transcrito y válvula de baipás de flash-gas.
- 1 controlador AK-PC-781A para control de los compresores de negativa de la central Booster.
- Módulos de ampliación para entradas y salidas tanto analógicas como digitales.
- Control de nivel de separador y de las bombas mediante salidas programables del AK-PC-781A que controla los compresores de

Foto 5: Controlador Danfoss AK-CC-550A

Foto 4: Controlador Danfoss AK-PC-781A

negativa.



Según se vio en el apartado 4.1.1., las instalaciones frigoríficas de transcrítico tienen cuatro zonas con presiones diferenciadas, cada una de ellas se diseña con una presión máxima de servicio (PS) distinta:

Presiones de diseño:

- Tuberías de ida y vuelta al gas cooler: 120 bar
- Tuberías de líquido: 90 bar
- Tuberías de aspiración de los compresores de baja Tº: 28 bar
- Tuberías de aspiración de los compresores de media Tº: 52 bar

Todas las tuberías y accesorios frigoríficos utilizados deberán tener una presión máxima de servicio, declarada por el fabricante, igual o superior a la presión de diseño escogida para el sector en el cual se encuentren instalados.

Para las tuberías de 120, 90 y 52 bar se utilizará la aleación de cobre de alta resistencia CuFe2P (conocida también como K65, nombre comercial de la marca Wieland).

Para las tuberías de 28 bar puede utilizarse el cobre frigorífico estándar, que soporta perfectamente dicha presión. De todas formas, y para evitar equivocaciones con el material, se recomienda utilizar también K65.

La soldadura recomendada es la siguiente:

Cu / Cu:	L-Ag 2P / L-Ag 15P
Cu / K65 (CuFe2P):	L-Ag 2P / L-Ag 15P
K65 / K65 (CuFe2P):	L-Ag 2P / L-Ag 15P
Cu / Latón:	L-Ag 20 / L-Ag 45 Sn (con fundente; "borax")
Cu / Acero al carbono:	L-Ag 20 / L-Ag 45 Sn (con fundente; "borax")
Cu / Acero inoxidable:	L-Ag 20 / L-Ag 45 Sn (con fundente; "borax")
K65 / Latón:	L-Ag 20 / L-Ag 45 Sn (con fundente; "borax")
K65 / Acero al carbono:	L-Ag 20 / L-Ag 45 Sn (con fundente; "borax")
K65 / Acero inoxidable:	L-Ag 20 / L-Ag 45 Sn (con fundente; "borax")

Nota: se recomienda preferentemente el tipo de soldadura que está en "negrita".

A continuación, se indican los diámetros calculados para las distintas tuberías de refrigerante:

Tuberías generales:

Tubería	Diámetro
Ida gas cooler	2 1/8"
Regreso gas cooler	2 1/8"
Líquido total	2 1/8"
Aspiración húmeda	4"
Aspiración seca	3"

4.8. Aislamiento térmico.

Para aislamiento de las tuberías de líquido y aspiración se utilizará aislamiento térmico flexible de estructura celular cerrada y con elevado factor de resistencia a la difusión del vapor de agua y baja conductividad térmica.

El material del aislamiento será espuma elastomérica a base de caucho sintético de color negro, tipo Armaflex AF o similar.

Los espesores utilizados serán crecientes en función del diámetro para garantizar la misma temperatura superficial y que no provoquen condensaciones.

La conductividad térmica será igual o inferior a 0,033 W/mK y el factor mínimo de resistencia a la difusión del vapor de agua será de 10.000.

El espesor recomendado será:

- Para línea de líquido: Armaflex tipo AF-5 con espesor nominal creciente de 25 a 32 mm.
- Para líneas de aspiración: Armaflex tipo AF-6 con espesor nominal creciente de 32 a 45 mm.

4.9. Seguridad

Las centrales frigoríficas de este proyecto ya están dotadas de elementos de seguridad intrínsecos como presostatos de seguridad para limitar las presiones y válvulas de seguridad como último elemento que garantiza que las presiones no puedan superar los valores de seguridad admisibles.

No obstante, se instalarán además los siguientes elementos para seguridad de las personas en caso de fuga de CO₂:

En la/s sala/s de máquinas se instalará un detector fijo de fugas de CO₂, con un nivel de pre-alarma a 5.000 ppm y otro nivel de alarma a 10.000 ppm. Dicho

detector se instalará a una altura no superior a 1 m desde el suelo, habida cuenta de la mayor densidad del CO₂ respecto del aire.

En la sala de máquinas, el nivel de pre-alarma pondrá en marcha ventilación mecánica de la sala, que extraerá de la parte baja de la sala de máquinas, garantizando una renovación de al menos 30 m³/h por cada 10 m² de sala de máquinas.

Si se activase el nivel de alarma, se prohibirá el acceso a la sala de máquinas a cualquier persona si no es con equipo de respiración autónomo.

En el interior del túnel, un detector fijo de fugas, al alcanzar el nivel de pre-alarma, darán orden al control del túnel de detener la entrada de refrigerante al evaporador. De esta forma, sólo el volumen de CO₂ contenido en el evaporador podrá escapar, ya que el evaporador, como ya se ha visto en el apartado 4.5, irán dotado de una válvula de retención a su salida que impedirá el retroceso de refrigerante procedente del separador hacia el interior del túnel.

5.- Evaluación del consumo energético anual de la instalación propuesta.

5.1.- Metodología de cálculo.

Para la evaluación del consumo energético anual de la configuración de instalación actual y la instalación convertida, se ha aplicado la siguiente metodología:

- Se han obtenido los datos de temperaturas medias de bulbo seco y bulbo húmedo para cada mes del año, utilizando la base de datos climatológicos ASHRAE WEATHER DATA VIEWER 6.0, para el observatorio de Santiago, situado en el aeropuerto internacional de Pudahuel. Este observatorio es el más cercano, con clima similar y existente en dicha base de datos, a la población de Linares, donde se encuentra la planta objeto del proyecto. En la tabla 2 se resumen dichos datos:

Tabla 2: Temperaturas medias seca y húmeda por mes

Mes	Temperatura media bulbo seco (°C)	Temperatura media bulbo húmedo (°C)
Enero	21,23	14,27
Febrero	20,37	14,07
Marzo	18,62	13,03
Abril	14,75	10,67
Mayo	11,20	8,52
Junio	8,84	6,91
Julio	7,98	6,06
Agosto	9,56	7,26
Septiembre	11,92	8,93
Octubre	14,73	10,49
Noviembre	17,51	11,84
Diciembre	19,77	13,22
MEDIA ANUAL	14,74	10,58

Fuente: ASHRAE Data Viewer 6.0

- Se ha considerado un porcentaje de funcionamiento de la instalación para cada mes del año, ya que la instalación es de uso claramente estacional ligado a las cosechas de berries. La empresa ha facilitado unos datos de consumo que han permitido establecer estos porcentajes de manera aproximada, que se recogen en la tabla 3.

Tabla 3: Porcentaje de funcionamiento de la instalación por mes

Mes	Datos KWh enviados por la empresa	Horas totales del mes	Porcentaje funcionamiento instalación
Enero	296.874,60	744	0,850
Febrero	282156,00	672	0,808
Marzo	250.190,85	744	0,716
Abril	123.205,13	720	0,353
Mayo	116.195,48	744	0,333
Junio	123.205,13	720	0,353
Julio	86.029,13	744	0,246
Agosto	66.946,05	744	0,192
Septiembre	61.561,88	720	0,176
Octubre	62.839,65	744	0,180
Noviembre	82.262,25	720	0,236
Diciembre	274.796,33	744	0,787

Fuente: elaboración propia

Nota: el porcentaje máximo de funcionamiento mensual se ha establecido en el 85% (mes de enero).

- Se ha calculado (estimado) el consumo energético para cada mes del año con ayuda de los softwares de cálculo de fabricantes de compresores, considerando que la carga frigorífica es del 100%.
Se ha considera una temperatura de condensación flotante, con ayuda de un sistema adiabático cuando la temperatura exterior supera los 20°C y según los datos de la tabla 2.
También se ha considerado en el consumo de la instalación, el consumo de los ventiladores de los condensadores.
El consumo de los ventiladores del evaporador del túnel y la bomba de refrigerante se ha considerado en el cálculo, con una estimación de 63 kW.

En la adjunta tabla 4, se recoge el resultado de los cálculos realizados:

Tabla 4: Instalación propuesta. Consumos energéticos por mes

Mes	Pot. Absorbida Total (kW)
Enero	345,87
Febrero	345,87
Marzo	367,39
Abril	345,87
Mayo	326,44
Junio	319,19
Julio	310,12
Agosto	319,19
Septiembre	326,44
Octubre	345,87
Noviembre	355,52
Diciembre	367,39

Fuente: elaboración propia

- Los consumos energéticos por mes de las tablas anteriores se ponderan por el porcentaje de horas de funcionamiento de cada mes establecido en la tabla 3, para establecer los kWh consumidos anualmente por cada instalación.

5.2.- Resultado de los cálculos.

Tabla 5: Energía consumida anual por la instalación propuesta (estimación)

Mes	Pot. Abs Total	Horas totales del mes	Porcentaje funcionamiento instalación	Energía consumida (kWh)
Enero	345,87	744	0,850	218.731,6
Febrero	345,87	672	0,808	187.769,1
Marzo	367,39	744	0,716	195.806,2
Abril	345,87	720	0,353	87.847,0
Mayo	326,44	744	0,333	80.800,2
Junio	319,19	720	0,353	81.070,9
Julio	310,12	744	0,246	56.833,9
Agosto	319,19	744	0,192	45.519,9
Septiembre	326,44	720	0,176	41.428,1
Octubre	345,87	744	0,180	46.299,1

Noviembre	355,52	720	0,236	60.291,0
Diciembre	367,39	744	0,787	215.063,1
TOTAL ANUAL				1.317.460,2

6.- Estimaciones de las emisiones de CO₂-eq directas e indirectas de la instalación propuesta.

Para la estimación de las emisiones de CO₂-eq se utilizará el concepto de TEWI (Total Equivalent Warming Impact), que tiene en cuenta las emisiones directas e indirectas, mediante la siguiente fórmula:

$$\text{TEWI} = f(\text{fugas}) + f(\text{pérdidas en la recuperación}) + f(\text{consumo de energía})$$

Es decir:

$$\text{TEWI} = (\text{GWP} \times \text{L} \times \text{n}) + (\text{GWP} \times \text{m} \times (1-\text{a})) + (\text{n} \times \text{E}_{\text{anual}} \times \text{b})$$

Donde:

GWP: Potencial de calentamiento global del refrigerante.

L: tasa de fuga (kg/año)

n: Vida útil operativa de la instalación (años)

m: carga total de refrigerante (kg)

a: recuperación de refrigerante final antes de desballestado de la instalación

E_{anual}: Consumo anual de energía (kWh/año)

b: emisiones de CO₂ procedentes del uso de energía (kg CO₂/kWh)

Los 2 primeros sumandos corresponden a las emisiones directas y el tercero a las indirectas.

6.1.- Cálculo del TEWI para la instalación propuesta.

Para dicho cálculo se tienen en cuenta los siguientes datos:

- Carga total de refrigerante estimada de la instalación de conversión: 1.200 kg
- GWP del CO₂: 1
- Tasa de fugas: 15% anual (180 kg/año). En este caso, al no encontrar datos publicados contrastados, se asume el mismo valor de tasa de fugas media para R-22 y R-507A recogidos en la pag. 247 del "IPCC/TEAP Special Report: Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System, 2005")
- Vida útil operativa de la instalación: se consideran 20 años.

- Recuperación final antes de desballestado de la instalación: NO
- Emisiones de CO₂ procedentes del uso de energía: 0,7668 kg CO₂-eq/kWh (dato procedente de la página web www.energíaabierta.cl y correspondiente a la media del año 2016)
- Consumo anual de energía: 1.317.460,2 kWh/año (ver punto 5.2.)

Con estos datos el cálculo del TEWI arroja el siguiente valor:

$$\text{TEWI} = (1 \times 180 \times 20) + (1 \times 1.200 \times (1-0)) + (20 \times 1.317.460,2 \times 0,7668)$$

$$\text{TEWI} = 3.600 + 1.200 + 20.204.570 = 20.209.370 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$$

$\text{TEWI} = 20.209,4 \text{ Tm CO}_2\text{-eq}$
--

Donde:

Consumo de energía: 99,98% del total

7.- Estimación del capital y costo de operación de la instalación propuesta.

Los costos estimados para la instalación de conversión descrita en el presente proyecto son:

Costos de adquisición (estimación)

- Central frigorífica203.000 US\$
- Separador de aspiración + bombas.....82.000 US\$
- Gas cooler46.000 US\$
- Unidad de emergencia.....17.700 US\$
- Túnel.....648.000 US\$
- Valvulería.....24.000 US\$
- Cuadro eléctrico de potencia y control.....93.000 US\$
- Elementos de seguridad.....15.000 US\$
- Tuberías, aislamiento, soportes.....66.000 US\$
- Instalación y puesta en marcha.....123.000 US\$

- Grúas y medios de elevación.....	15.000
US\$	

TOTAL COSTE ADQUISICIÓN.....1.332.700 US\$

Costos de operación (estimación):

Según los consumos energéticos estimados para los compresores y condensadores en el apartado 5.2. y el precio de la energía según el Informe “Comparación de Precios de Electricidad en Chile y países de la OCDE y América Latina” disponible en la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile se estiman en:

$$1.317.460,2 \text{ kWh} \times 0,154 \text{ US$/kWh} = 202.888,97 \text{ US$ /año}$$

Este valor debe incrementarse con el consumo de los desescarches, que se estima en un 5% adicional, por tanto:

Costo de operación estimado: 213.033 US\$/año

8.- Conclusiones.

Este proyecto demuestra es posible la utilización de tecnología existente para el refrigerante CO₂ en las instalaciones frigoríficas del sector de Proceso de Fruta y Hortaliza en Chile, en concreto en túneles de congelación.

En particular, la tecnología conocida como Booster Transcrítico con Baipás de Flash-gas es adecuada.

Además, las favorables condiciones ambientales anuales de la región del Maule posibilitan el uso de esta tecnología en una versión simplificada mediante el apoyo de un sistema adiabático para condensación durante unas pocas horas anuales.

Esta nueva tecnología procura también un ahorro energético comparada con la tecnología actual con freones y amoniaco. El ahorro respecto del amoniaco en esta aplicación está en torno al 5% anual.

El coste de adquisición de la solución con CO₂ transcrítico en este caso es muy similar, incluso ligeramente inferior, al coste de adquisición de la instalación con amoniaco.

