



AEFYT



LA REVISTA OFICIAL DE LA INDUSTRIA DE REFRIGERACIÓN CON AMONIACO ■ DICIEMBRE 2022

CONDENSER

Selects

UNA SELECCIÓN DE ARTÍCULOS DE CONDENSER TRADUCIDOS AL ESPAÑOL



¿Qué refrigerante utilizar?

COMPARANDO REFRIGERANTES EN APLICACIONES DE REFRIGERACIÓN INDUSTRIAL.

CTI ESPECIALISTAS EN DETECCIÓN DE GASES



INVENTARIO EN STOCK DISPONIBLE

¿Necesita ayuda para diseñar un sistema de detección de gas Amoniaco que cumpla con todas las normativas vigentes? ¡Miguel y Steven pueden ayudar!

Email:

miguel.lopez@ctigas.com

steven.kassel@ctigas.com

+1-573-446-0657

CONSTRUIDOS PARA CONDICIONES EXTREMAS

Escanee el código para ver más información y especificaciones del producto en nuestro sitio web.



www.ctigas.com | ventas@ctigas.com | +1-573-446-0657



BY GARY SCHRIFT



mensaje del

PRESIDENTE

“**E**stamos encantados de compartir con ustedes una selección de nuestros artículos de la revista Condenser del IAR, traducidos al idioma español por nuestra Asociación Aliada en España: AEFYT. La visión del IAR es crear un mundo mejor a través del uso seguro y eficiente de refrigerantes naturales. Pensamos que estas ediciones son una forma efectiva en que podemos lograr

precisamente eso. Con la ayuda de nuestros aliados en España y en todo el mundo, estamos seguros de que los refrigerantes naturales como el amoníaco, el CO₂ y los hidrocarburos proporcionarán un futuro sostenible y próspero para todos. Esta selección de artículos ha sido agrupada por temas principales que reflejan un aspecto importante de la industria de refrigeración con refrigerantes

naturales. En IAR y AEFYT esperamos que este esfuerzo conjunto para comunicar las últimas noticias e información dentro de la industria brinde a nuestros miembros de habla hispana conocimientos nuevos, información útil y recursos para expandir el uso seguro y sostenible de los refrigerantes naturales. Si desea leer el artículo original de la revista Condenser en inglés, visite el sitio web del IAR en: www.iar.org. ¡Esperamos que los disfrute!”

“We are delighted to share with you a selection of our IAR’s Condenser Magazine articles, translated to the Spanish language by our Allied Association in Spain: AEFYT. IAR’s vision is to create a better world through the safe and efficient use of natural refrigerants. We believe this is one way we can achieve just that. With the help of our partners in Spain and around the world, we are confident that natural refrigerants such as ammonia, CO₂ and hydrocarbons will provide a sustainable and prosperous future for all. This selection of articles has been grouped by main themes that reflect an important aspect of the natural refrigeration industry. We at IAR and AEFYT hope that this joint effort in communicating the latest news and information within the industry provides our Spanish speaking members with new insights, useful information and resources to expand the safe and sustainable use of natural refrigerants. If you would like to read the original Condenser Magazine article in English, visit the IAR website at: www.iar.org. Enjoy!”



BY MANUEL LAMÚA



mensaje del

GERENTE

“**E**n AEFYT siempre se ha valorado positivamente las acciones desarrolladas por el IAR sobre la difusión de conocimiento relacionado con el uso del amoníaco como refrigerante. La revista Condenser del IAR es una publicación muy potente con contenidos teóricos, tecnológicos y promocionales muy interesantes. Al plantear al IAR que

una forma de colaboración podía ser la traducción de artículos agrupados temáticamente para una publicación conjunta, les pareció una idea estupenda ya que aumentaba la difusión del trabajo desarrollado previamente por IAR creando a la vez documentos temáticos en español sobre asuntos importantes en refrigeración industrial. Con la ayuda del IAR, queremos aportar nuestro granito

de arena facilitando la transmisión de conocimiento que permita la instalación segura de los sistemas frigoríficos, para que los refrigerantes naturales como el amoníaco, CO₂ e hidrocarburos, aporten soluciones sostenibles en un mundo donde el frío es cada día más necesario. Esperamos que la lectura de los artículos sea agradable y quede la misma se extraigan conocimientos útiles. Y nada más, visite nuestra web www.aefyt.es. Gracias.”

“At AEFYT, we always have valued IAR’s work on expanding the knowledge for the safe use of ammonia as a refrigerant. The Condenser Magazine published by IAR is a powerful publication with very interesting theoretical, technical concepts, and promotional content. When we proposed collaborating in the translation of these articles for a joint publication to IAR, they agreed this would be a great idea, which will expand on the work previously done, while sharing common themed documents in the Spanish language on important issues in industrial refrigeration. With the help of IAR, AEFYT wants to contribute with a ‘grain of sand’ to facilitate this transmission of knowledge for the safe installation of refrigeration systems. In this way, natural refrigerants such as ammonia, CO₂ and hydrocarbons can provide sustainable solutions in a world where ‘cold’ is every day more necessary. We hope that you will find reading of these articles enjoyable, and that they provide you with useful knowledge. Feel free to visit our website www.aefyt.es. Thank you”

Comparación de amoníaco con 1234yf

Traducido por Félix Sanz (AEFYT)

Aunque el amoníaco ha sido el refrigerante elegido en los sistemas de refrigeración industrial durante más de un siglo, se ha enfrentado la competencia de numerosos refrigerantes sintéticos, siendo los más recientes el R1234yf y el R32. Aunque el uso de amoníaco trae consigo una mayor carga regulatoria, sigue siendo la opción más lógica como refrigerante en grandes sistemas de refrigeración, especialmente desde el punto de vista de la seguridad, la eficiencia y el medio ambiente.

Desde una perspectiva de seguridad, el amoníaco posee numerosas ventajas sobre el R1234yf. Aunque ambos refrigerantes tienen un calor de combustión y unas características de propagación de la llama razonablemente comparables, el amoníaco tiene una temperatura de autoignición más alta y requiere una densidad de vapor mucho más alta a la temperatura normal del aire, características de importancia crítica en el caso de una fuga. Extraer el amoníaco, especialmente de una sala de equipos, es relativamente fácil y no presenta ningún problema relacionado con el efecto invernadero.

Jerry Dohlen, presidente de Newark Refrigerated Warehouse indica que “el amoníaco tiene un peso molecular bajo y su vapor es inherentemente ligero”. “Por esto, si el amoníaco fuga en una sala de máquinas, el vapor subirá hacia el techo. Esto facilita la eliminación del vapor colocando ventiladores en el techo. Cuando se detecta una fuga, se aumenta la velocidad del ventilador, el amoníaco se arrastra en el aire a gran velocidad, se eleva y se disipa”.

Por el contrario, el vapor de 1234yf es casi siete veces más pesado que el amoníaco y, en caso de fuga, caerá al suelo y desplazará al oxígeno respirable. Cuando el 1234yf cae al suelo, las personas pueden asfixiarse incluso antes de darse cuenta de que

están en peligro y eso significa que hay una gran dependencia de los detectores de refrigerante.

Esto conduce a otra ventaja del amoníaco, que es que puede detectarse a menos de cinco partes por millón. Las personas pueden tolerar el amoníaco a una exposición de hasta 300 ppm durante períodos cortos de tiempo sin efectos nocivos. Y el olor del amoníaco proporciona un sistema de auto alarma, lo que hace que las personas evacuen el área, mientras que el 1234yf al ser inodoro, se convierte potencialmente en un asesino silencioso.

Además, la menor densidad del amoníaco líquido permite separar el aceite del lado baja de forma más fácil. El aceite aumenta la inflamabilidad de cualquier refrigerante. En el caso de un incendio, es más fácil extinguir la llama con amoníaco porque una mezcla de amoníaco y aire con un 10 por ciento o más de vapor de agua no favorecerá la combustión.

Si ocurre un incendio con 1234yf, se emitirán gases venenosos. Von Dohlen comentó “Si respiras amoníaco cuando se quema, puedes enfermarte”. “Pero si respiras 1234yf quemado, podrías morir fácilmente”.

El amoníaco también es una opción mejor cuando se trata de eficiencia. El calor de vaporización del amoníaco es de 589 BTU/lb, frente a 77 BTU/lb por 1234yf. Por lo tanto, para lograr 589 BTU de enfriamiento con amoníaco, se una libra, en comparación con casi ocho libras con 1234yf. Von Dohlen indicó “Cada vez que se bombea un fluido a través de una tubería, hay pérdidas por fricción, y a temperaturas comunes, estas pérdidas, son mucho menores con el amoníaco que con cualquier otro refrigerante”.

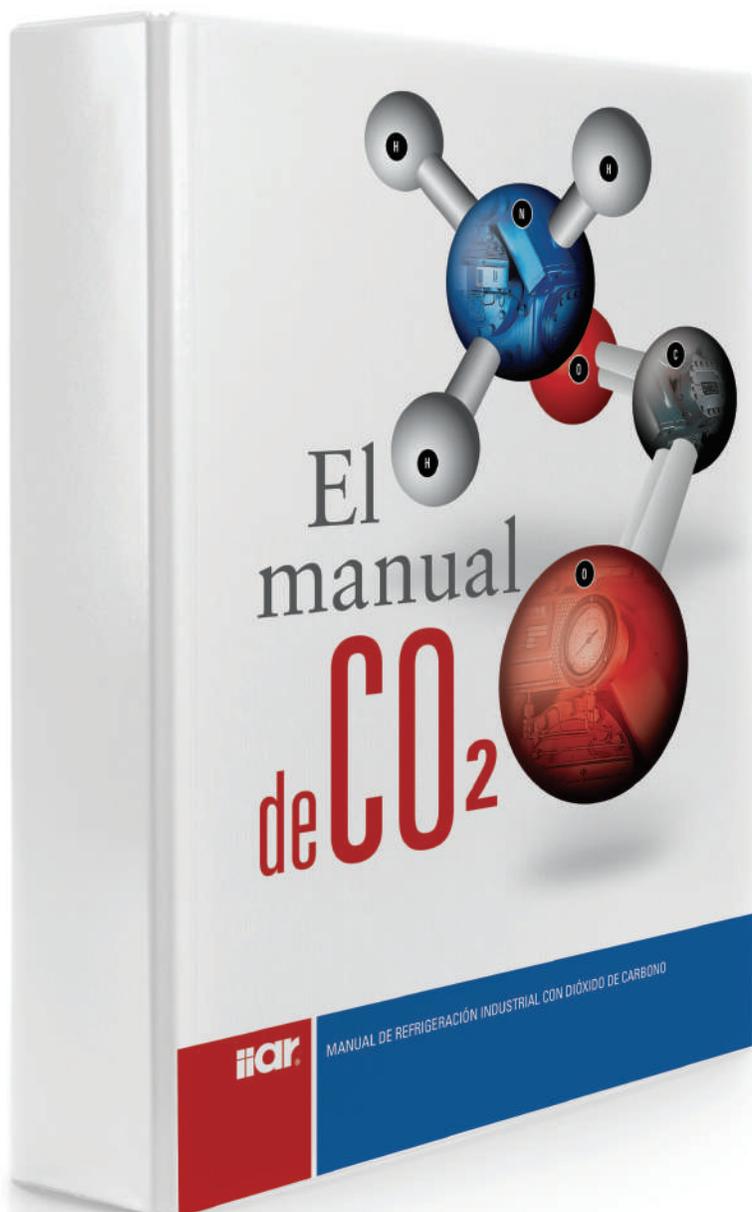
Hay otras ventajas de utilizar amoníaco. La compresión de 1234yf es menos eficiente porque requiere casi el doble de desplazamiento del

compresor. El punto de ebullición del amoníaco es más bajo, lo que significa que estará en vacío con menos frecuencia para aplicaciones de baja y media temperatura. El amoníaco también es más económico, alrededor de 88 centavos por libra, en comparación con un precio de 1234yf y R32 de \$40 a \$50 por libra. El amoníaco es un producto común y está disponible en casi todo el mundo.

Finalmente, el amoníaco es una alternativa ambiental más sabia. Dohlen dijo “No importa cuánto amoníaco se libere, no afectará a la capa de ozono ni al potencial de calentamiento global”. “Es un refrigerante natural, por lo que no tiene ningún impacto en el medio ambiente”.

El principal inconveniente del amoníaco es la actual carga regulatoria. La EPA (Agencia de Protección Ambiental) requiere que una instalación informe en 15 minutos de fugas de amoníaco de 100 libras o más durante las 24 horas anteriores. “El amoníaco pesa un poco menos de seis libras por galón, por lo que 100 libras equivalen a unos cinco galones es derramada en el techo durante 24 horas”, indicó Dohlen. “Hay personas que adoptan 1234yf porque no quieren lidiar con la carga regulatoria excesiva del amoníaco. Pero si el gobierno considerara las propiedades físicas del amoníaco frente a otros sintéticos, se daría cuenta de que el amoníaco ofrece muchos beneficios a nuestra cadena alimentaria y, debido a la mejora de la eficiencia, podría reducir significativamente la demanda de la industria de refrigeración en nuestra red eléctrica.

Von Dohlen indicó “Al final, los beneficios del amoníaco están en la seguridad, la eficiencia, el costo y en el hecho de que es bueno para el medio ambiente. Si la carga regulatoria se puede reducir, la elección del amoníaco es una obviedad”.



Desde los fundamentos del diseño para aplicaciones industriales, hasta la puesta en marcha y el funcionamiento, el **COMPLETAMENTE NUEVO MANUAL DE CO₂** es una necesidad técnica como recurso para la industria de profesionales de la refrigeración con refrigerantes naturales en todo el mundo.

NEW TO THE IAR CO₂ HANDBOOK:

- Conjunto completo de diagramas NIST de presión/entalpía – unidades SI y LP
- Inclusión de propiedades Termodinámicas y termofílicas - unidades SI y LP
- Amplia sección sobre aplicaciones con salmuera volátil
- Nueva información sobre aplicaciones transcíticas
- Diseño actualizado y técnicas de instalación

PRECIO MIEMBRO IAR: \$550.00

PRECIO NO SOCIO: \$1100.00

Al obtener el Manual de CO₂ usted tiene acceso directo a los materiales complementarios referenciados en el Capítulo 6 Sección 6.2. Haga clic [aquí](#) para descargar.

Disponible en [español](#).

Ordene su copia electrónica hoy

Comparación de costes de operación entre sistemas de recirculación de CO2 transcrito y amoníaco en un almacén frigorífico

Chris Herzog Director, Socios de equipos de refrigeración industrial y Peter Lepschat, Director de Ingeniería de Almacenamiento en frío de Henningsen

Traducido por Cristian Villarín (Coldsulting), Ignacio Baixali (Eliwell Ibérica), Jordi Madroñero (Panasonic)

INTRODUCCIÓN

Henningsen Cold Storage Co. (HCS) es una empresa pública de almacenamiento refrigerado establecida principalmente en el noroeste del Pacífico. Está en el negocio desde 1923, HCS opera más de 60 millones de pies cúbicos de almacenamiento con control de temperatura múltiple en 13 instalaciones. La empresa adopta una cultura de mejora continua y la ha aplicado innumerables veces en el diseño de nuevas instalaciones y en la optimización de las existentes.

Por ejemplo, en términos de eficiencia energética, los esfuerzos de mejora continua han reducido el consumo específico de electricidad en las instalaciones de HCS a una fracción de los promedios de la industria. La Asociación Internacional de Almacenes Refrigerados (IARW) realiza encuestas periódicas a sus miembros, y un área de investigación

es el consumo de energía. Con base en los datos que recopila, la IARW calcula una métrica de consumo de energía específico promedio, expresada en kWh/ft³ anual. En una encuesta de IARW de 2015, el promedio de la industria fue de 1,12 kWh/ft³ de espacio refrigerado. Como punto de comparación, el promedio corporativo de HCS en el año fiscal 2017/2018 fue de 0,482 kWh/ft³. Las dos instalaciones refrigeradas de amoníaco construidas más recientemente de HCS funcionan a 0,3 kWh/ft³ o menos. La Tabla 1 ilustra el consumo de energía específico de HCS por instalación durante los últimos dos años fiscales.

La instalación más nueva de Henningsen se instaló en Grandview, WA, es una cámara de congelación de aproximadamente 100.000 ft² diseñada para albergar aproximadamente 20.000 pallets a -5 °F y un espacio de plataforma refrigerada de 11.000 ft² a +40 °F. Esta instalación abrió sus puertas el 28 de junio de 2018 para dar servicio a los procesadores de frutas locales. No se incluye en la Tabla 1 debido a la falta de datos energéticos significativos.

Proceso de toma de decisiones Al principio del proceso de planificación de la nueva instalación, HCS decidió investigar los refrigerantes/sistemas de refrigeración alternativos al amoníaco anhidro. Las iniciativas anteriores se habían centrado en reducir la cantidad de refrigerante de amoníaco en el sistema y habían tenido mucho éxito en la reducción de las cargas mientras se mantenían los niveles líderes de eficiencia energética en la industria. El siguiente paso lógico era ver si era posible reducir o incluso eliminar el amoníaco de un sistema y seguir

funcionando de manera eficiente en comparación con los mejores sistemas de amoníaco.

Los siguientes pasos describen el proceso utilizado para determinar la viabilidad de las tecnologías alternativas:

- (1) Establecer el objetivo: Reducir nuestra carga de amoníaco por debajo de su cantidad umbral planificada (TPQ) de 500 lb o eliminarla por completo.
- (2) Identificar opciones para comparar:
 - a. Unidad compacta de NH₃,
 - b. Unidades compactas o partidas que utilizan refrigerantes sintéticos,
 - c. Sistema en cascada de CO₂/NH₃,
 - d. Sistema de CO₂ transcrito, y
 - e. Central de amoníaco de baja carga de refrigerante.
- (3) Generación de una lista de categorías para comparar:
 - a. Inversión inicial, incluidos los impactos en los costes de construcción relacionados con las instalaciones;
 - b. Eficiencia energética y otros costes de utilización;
 - c. Costes de operación y mantenimiento;
 - d. Fiabilidad a corto y largo plazo;
 - e. Efectos sobre los plazos de construcción;
 - f. Costes de cumplimiento normativo;
- (4) Definir una lista de preguntas específicas o comparaciones para cada categoría. El Apéndice 1 es un ejemplo de un esquema que ilustra las categorías y preguntas específicas. Hay que tener en cuenta que esta no es una lista completa; surgieron muchos

Table 1. Consumo anual instalaciones de HCS (kWh/ft³)

	AF17	AF18
Instalación 1	0.745	0.770
Instalación 2	0.400	0.398
Instalación 3	0.311	0.301
Instalación 4	0.323	0.496
Instalación 5	1.114	1.019
Instalación 6	0.569	0.553
Instalación 7	0.557	0.641
Instalación 8	0.508	0.496
Instalación 9	0.256	0.273
Instalación 10	1.056	1.133
Instalación 11	0.359	0.347
Instalación 12	0.000	0.264
Media	0.471	0.482

otros factores que también fueron incluidos en las reuniones mantenidas durante el proceso de evaluación.

- (5) Obtener respuestas a cada pregunta para cada tipo de
 - a. Expertos de la industria;
 - b. Usuarios finales experimentados;
 - c. Empresas de ingeniería independientes;
 - d. Publicaciones técnicas, así como libros blancos (WhitePapers), libros de texto, datos técnicos de fabricantes y publicaciones comerciales;
 - e. Asociaciones comerciales, incluidas sus redes de contactos, ferias/exposiciones comerciales de la industria y presentaciones y documentos técnicos; y
 - f. Fabricantes de sistemas.
- (6) Realizar un análisis comparativo de las preguntas y respuestas recogidas.

Considerar

- a. Ventajas de cada opción para cada pregunta,
 - b. Desventajas de cada opción para cada pregunta, y
 - c. "Aspectos graves" que eliminarían instantáneamente una opción.
- (7) Asignar una ponderación a cada pregunta para ayudar a tomar la decisión final.

Algunos de los tipos de sistemas de refrigeración identificados demostraron ser relativamente fáciles de descartar al principio del proceso por varias razones. Por ejemplo, con el futuro regulatorio incierto de los hidrofluorocarbonos HFC y otros refrigerantes sintéticos y las sanciones energéticas conocidas asociadas con este tipo de sistemas en comparación con las opciones comprobadas que utilizan refrigerantes naturales, los sistemas partidos y compactos convencionales con HFC no se consideraron alternativas viables incluso después de considerar sus reducidos costes iniciales y cargas regulatorias. Los costes de energía relativamente altos, el coste alto y creciente de los refrigerantes HFC y la posible falta de refrigerantes de

reemplazo adecuados después de las fechas proyectadas de eliminación de refrigerantes contribuyeron a la decisión de eliminarlos de la comparación.

Del mismo modo, el sistema en cascada de CO₂/NH₃ se descartó desde el principio, pero por diferentes razones: Apenas proporcionó reducción en la carga regulatoria, ni aumento la mejora mínima en la seguridad del operario, mayor complejidad, mayor consumo de energía que los sistemas de NH₃ existentes, un coste inicial más alto, y mayores costes de operación y mantenimiento.

Al eliminar estas opciones del análisis quedaron tres opciones para comparar: unidad compacta de amoníaco, CO₂ transcrito y amoníaco convencional de baja carga. Estas tres opciones de sistemas se introdujeron en una matriz y se respondió a cada pregunta para cada tipo de sistema. Claramente, este trabajo se volvió muy extenso y, por lo tanto, no se ha incluido en su totalidad en este documento. En cambio, en el Apéndice 2 se puede encontrar un documento abreviado que ilustra ejemplos de preguntas aplicadas a cada tipo de sistema.

ANÁLISIS DE COSTES

Los resultados del análisis inicial realizado por HCS indicaron que los tipos de sistemas más prometedores eran la planta de amoníaco central "tradicional" (con características de diseño especiales para mejorar la eficiencia y reducir la carga) y el sistema de CO₂ transcrito. HCS conocía bien las características del sistema de amoníaco, y sus costes podían asumirse razonablemente a partir de algunas de sus instalaciones existentes. Pero el nuevo sistema de CO₂ transcrito era algo así como un comodín. Al ser una tecnología más nueva y menos comprendida, determinar los costes operativos con alta precisión era importante para tomar la mejor decisión.

CONSUMO DE ENERGÍA

Para recopilar los datos más precisos posibles, particularmente en el área del uso de energía, se contrató a una empresa especializada en el uso de energía en instalaciones refrigeradas

para predecir el consumo anual de energía del sistema de CO₂ y el sistema de amoníaco, dada la construcción, el tipo de sistema, el clima y el uso previsto de la instalación.

Esta empresa también analizó un tercer tipo de sistema: un sistema compacto de freón convencional con múltiples unidades de condensación enfriadas por aire, montadas en el techo y acopladas con evaporadores de expansión directa y con descarche eléctrico. Este sistema se incluyó porque tiene el coste inicial más bajo y era deseable comparar los ahorros de energía y el diferencial de costes entre este y los otros dos sistemas. La información resultante de esta comparación se utilizó cuando se negociaron los incentivos o descuentos financieros disponibles con los proveedores locales de energía (Tabla 2).

El Apéndice 3 proporciona el análisis de energía en su totalidad. El primer hallazgo clave es que el sistema de CO₂ transcrito usa más energía que el sistema de NH₃, pero no mucha más. Hay que recordar que el sistema NH₃ de comparación tiene un uso de energía específico que es un 75% más bajo que el promedio de la industria. En realidad, en comparación con un estándar de la industria, se prevé que el sistema transcrito utilice alrededor de un 50 % menos de energía específica.

El sistema de amoníaco analizado incluía numerosas medidas de ahorro de energía que se han incorporado con éxito en otros sistemas HCS modernos: evaporación y condensación flotante, descarche predictivo de gas caliente con drenajes flotantes, variadores de frecuencia en todos los ventiladores, variadores de frecuencia para al menos un compresor de tornillo, enfriamiento de aceite de glicol con recuperación de calor y deshumidificación del muelle. El sistema de CO₂ transcrito también incluía muchas medidas de eficiencia energética (MEE); forman parte del análisis energético completo y también se describen en la sección Detalles del sistema de CO₂ más adelante en este documento. El sistema HFC estaba destinado a ser

Comparación de costes de operación entre sistemas de recirculación de CO2 transcrito y amoníaco en un almacén frigorífico

una línea base solo para comparación, por lo que se analizó en su forma más simple, sin MEE.

Aunque el uso de energía previsto

medida la eficiencia del enfriador de gas. La nueva instalación de HCS se ubicaría en un área con un clima relativamente seco (temperatura

de bulbo húmedo de diseño de aproximadamente 70 °F o 21 °C), aunque las temperaturas superan con frecuencia los 100 °F (38 °C) en verano. Se espera que el enfriador de gas asistido adiabáticamente mantenga la temperatura de descarga saturada por debajo del punto crítico de CO2 (88 °F/31 °C) incluso cuando las temperaturas ambientales son mucho más altas. Debido a que la eficiencia del sistema de CO2 sufre mucho cuando se excede el punto crítico, se encontró que valía la pena emplear un enfriador de gas asistido adiabáticamente, a pesar del coste adicional del agua. Afortunadamente, este tipo de intercambiador de calor usa menos agua que un condensador evaporativo, como se ve en la Tabla 3.

Tabla 2. Uso de energía previsto para los sistemas NH3, CO2 y HFC

Tipo de sistema	kWh Annual	kWh Relativo	*kWh/ft ³
NH3Moderno	717,652	1.0	0.170
CO2Transcrito	868,462	1.21	0.206
HFC Tradicional	2,620,859	3.65	0.620

*Tener en cuenta que los valores de kWh/ft3 son solo para la energía del sistema de refrigeración y no incluyen otros usos eléctricos en la instalación.

es más bajo para el sistema NH3, el sistema CO2 está lo suficientemente cerca como para justificar una mayor investigación. Después de todo, el uso de energía es el segundo coste operativo más grande en una instalación de este tipo, aunque no es el único coste.

CONSUMO DE AGUA

Un área en la que el sistema de CO2 puede ser superior a un sistema de NH3 convencional es el uso del agua. Aunque esto se pasa por alto con frecuencia, el coste del agua para un condensador de amoníaco evaporativo es significativo. Un sistema de CO2 transcrito generalmente usa un enfriador/condensador de gas enfriado por aire, que no usa agua en absoluto. Esto, sin embargo, no es muy bueno desde la perspectiva del uso de la energía. En el clima de las instalaciones de Grandview, se encontró que la aplicación más rentable era un enfriador de gas (gas-cooler) asistido adiabáticamente. Este intercambiador de calor utiliza un material similar al relleno que se encuentran en las torres de enfriamiento. El relleno se humedece con cabezales de rociado o goteo, y el aire que entra al enfriador de gas seco debe pasar primero a través de este relleno. El aire resultante se pre-enfría hasta casi la temperatura de bulbo húmedo, lo que puede aumentar en gran

Tabla 3. Uso de agua previsto para los sistemas de NH3 y CO2

Sistema	Evaporación (gal/yr)	Perdidas (gal/yr)	Uso anual total (gal/yr)
NH ₃	1,391,542	695,771	2,087,313
CO ₂	261,905	86,167	348,072
Diferencia	1,129,637	609,604	1,739,241

Ahorro Anual de Energía incluyendo las Actualizaciones del Sistema

Descripción de la medida de eficiencia	Ahorro anual kWh	Ahorro kW (media mensual)	Ahorro coste eléctrico anual	Coste elegible
Sistema básico de CO2 frente al sistema Pkgd R507	1,032,553	129	\$59,192	\$375,623
Deshumidificación de muelles	63,027	13	\$3,649	\$39,028
Evaporadores de congeladores eficientes	56,323	5	\$3,215	\$20,880
Control óptimo del ventilador del evaporador	315,987	50	\$18,187	\$27,664
Optimización del gas cooler	196,088	69	\$11,549	\$47,440
Calefacción de la sala de rociadores	16,369	0	\$924	\$6,277
Bomba de glycol VF	44,676	5	\$2,557	\$18,748
Puertas del congelador de alta velocidad	27,374	3	\$1,566	\$29,755
Total:	1,752,397	274	\$100,839	\$565,414
Amortización simple sin incentivos.				5.6 años
Incentivo financiero estimado				\$262,860
Amortización simple con incentivos				3.0 años
Retorno de la inversión				33%

Tabla 4. Detalles de construcción de refrigeración NH3 vs. CO2

NH3 Tradicional	CO2 Transcritico
Numerosos componentes principales instalados en el sitio y conectados con tuberías	Solo dos componentes principales instalados en el sitio: central de compresores y enfriador de gas
Sala de máquinas separada con normativa específica del código de edificación	Requisitos más simples para la instalación en interiores, se puede instalar en exteriores
Tuberías principales grandes con ramificaciones más pequeñas a cada evaporador	Tuberías a cada evaporador; solo se necesitan dos tubos incluso para desescarhe por gas caliente, los tubos de CO2 tienden a ser más pequeños
Se requieren soportes pesados para tuberías y válvulas	Tuberías más ligeras y pequeñas con menos válvulas
Son necesarios sistemas de aislamiento de tuberías cuidadosamente diseñados e instalados para evitar la corrosión de las tuberías.	Las tuberías o tubos de acero inoxidable tienen una resistencia a la corrosión mucho mayor, lo que permite materiales y procesos de aislamiento más simples.
Proceso de permisos mucho más riguroso y costoso debido al refrigerante peligroso B2	Permisos relativamente simples para refrigerantes A1
Sistema de alivio elaborado y de gran ingeniería con posible gran tanque de difusión	Sistema de alivio muy simplificado
Seguridad del sitio mucho mayor (Seguridad Nacional, robo de amoníaco)	Sin requisitos especiales de seguridad
Requisitos de cumplimiento onerosos (PSM, RMP, General Duty Clause, etc.)	Muy poca regulación

Dependiendo del coste del agua y del tratamiento del agua, esto puede ser una ventaja de coste significativa para el sistema de CO2. Para este proyecto, los ahorros anuales previstos incluyeron aproximadamente \$20,000 para agua, alcantarillado y mantenimiento. Este valor puede ser aún mayor si se asigna un valor a la “responsabilidad ambiental” basada en no desperdiciar millones de galones de agua cada año.

CONSTRUCCIÓN DEL EDIFICIO

La construcción de un almacén refrigerado es costosa, y el coste de una sala de máquinas de amoníaco que cumpla con la normativa es una

parte importante de ese gasto. Según el Código Internacional de Incendios (2015) y IIAR 2 (2014), las salas de refrigeración de amoníaco deben tener clasificación contra incendios (o rociadores) y contener sistemas de seguridad con detección de amoníaco, alarmas y ventiladores. El equipo debe estar anclado a losas estructurales de ingeniería y las tuberías grandes y pesadas deben estar sujetas.

Por el contrario, un sistema de CO2 transcrito utiliza centrales de compresores construidas en fábrica que son relativamente compactas en comparación con los equipos de NH3 y puede ubicarse en el exterior. Las tuberías tienden a ser más pequeñas y

livianas (con frecuencia son tuberías de acero inoxidable en lugar de tuberías S40 o S80). No hay grandes grupos de válvulas que soportar, ya que casi todas las válvulas de control están ubicadas en el bastidor del compresor. Todavía se requiere una estructura significativa para soportar la central de compresores y el enfriador de gas (condensador). Pero la central de compresores se puede ubicar al aire libre, en el techo o en un espacio de sala de máquinas más pequeño y simple. Se solicitaron cotizaciones de construcción para la nueva instalación con sistemas de refrigeración tanto de NH3 recirculado convencional como de CO2 transcrito. Incluyendo todos los costes, excepto el sistema de refrigeración, el precio de construcción fue de aproximadamente \$300,000 menos para la opción de CO2.

SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Otra área que favorece al CO2 sobre el NH3 tradicional es el coste del propio sistema de refrigeración. El proceso de construcción es bastante diferente, como ilustra la Tabla 4.

Dadas estas diferencias, el coste total del sistema de refrigeración se cotizó alrededor de \$534,000 menos con CO2 que con NH3. Otro factor importante que considerar es que la instalación de CO2 tuvo un tiempo estimado de construcción de 5 a 6 semanas menos que la misma instalación con un sistema de NH3.

OTRAS DIFERENCIAS DE COSTES

Junto con estos elementos de costes principales, algunos otros costes pueden favorecer el sistema de CO2. Éstos incluyen

- Seguro,
- Disminución del personal de mantenimiento,
- Mantenimiento del sistema de refrigeración interno,
- Costes de cumplimiento de normativa, y
- Formación en seguridad de los empleados.

Cuando se evaluaron los números,

Comparación de costes de operación entre sistemas de recirculación de CO2 transcrito y amoníaco en un almacén frigorífico

Tabla 5. Comparación de sistemas

Métrica	CO2	Central de NH3 de baja carga
Costes del sistema	\$534k menor	Mayor
Costes de construcción	Aproximadamente \$300k menos	Mayor
Tiempo de construcción	5-6 semanas menos	5-6 semanas extra
Eficiencia	Mayor consumo eléctrico (\$13,000 al año)	Menor consumo eléctrico
Servicios públicos	Menos agua y alcantarillado	Más agua y alcantarillado (\$20,000 por año)
O&M	Menos costoso	Mas costoso
Tratamiento de agua	Sin tratamiento de agua	Tratamiento de agua necesario
Fiabilidad	Muy fiable	Muy fiable

el sistema transcrito de CO2 fue un ganador convincente y sorprendente (Tabla 5). A pesar de un mayor uso de energía pronosticado, ofreció grandes ahorros de costes para la construcción inicial y el potencial de compensar un mayor uso de energía con un menor uso de agua, además de otros costes operativos más bajos. Finalmente, HCS decidió construir el sistema de CO2.

DETALLES DEL SISTEMA DE CO2

Este documento no pretende explicar cómo funciona la refrigeración con CO2 transcrito ni ofrecer instrucciones a los diseñadores. Hay disponibles numerosas referencias sobre esos temas. Más bien, este documento tiene como objetivo examinar el diseño y la operación de un sistema en particular para comparar las similitudes y diferencias entre éste y la refrigeración con amoníaco. La Figura 1 muestra un esquema simplificado para este sistema.

Las grandes unidades de CO2 transcrito se asemejan a las de las tiendas de comestibles y otras centrales de compresores comerciales. Esto se debe en parte a que estos sistemas fueron los primeros en utilizarse en aplicaciones comerciales

y en parte a que están contruidos con una selección actualmente limitada de compresores semi-herméticos. Esta central incluye varias unidades de dos modelos de compresores, un compresor de 30 hp (22 kW) y otro de 50 hp (37 kW). Todos los recipientes a presión, los intercambiadores de calor y las válvulas de control también están en el bastidor, con una excepción. Las válvulas de expansión motorizadas se montan directamente en los evaporadores. El enfriador de gas se monta al aire libre como un condensador convencional y los evaporadores se cuelgan del techo dentro del almacén.

El sistema que se describe aquí es un circuito de refrigeración de dos etapas que comienza con los compresores de baja temperatura, que funcionan aproximadamente a 212 psig de aspiración (14,6 barg) y descargan en el separador de presión intermedia/intercooler (MT ACC) a 441 psig (30,4 barg). Este recipiente enfría el gas de descarga de los compresores de baja temperatura y también es el separador de aspiración para los evaporadores de muelle. El vapor de

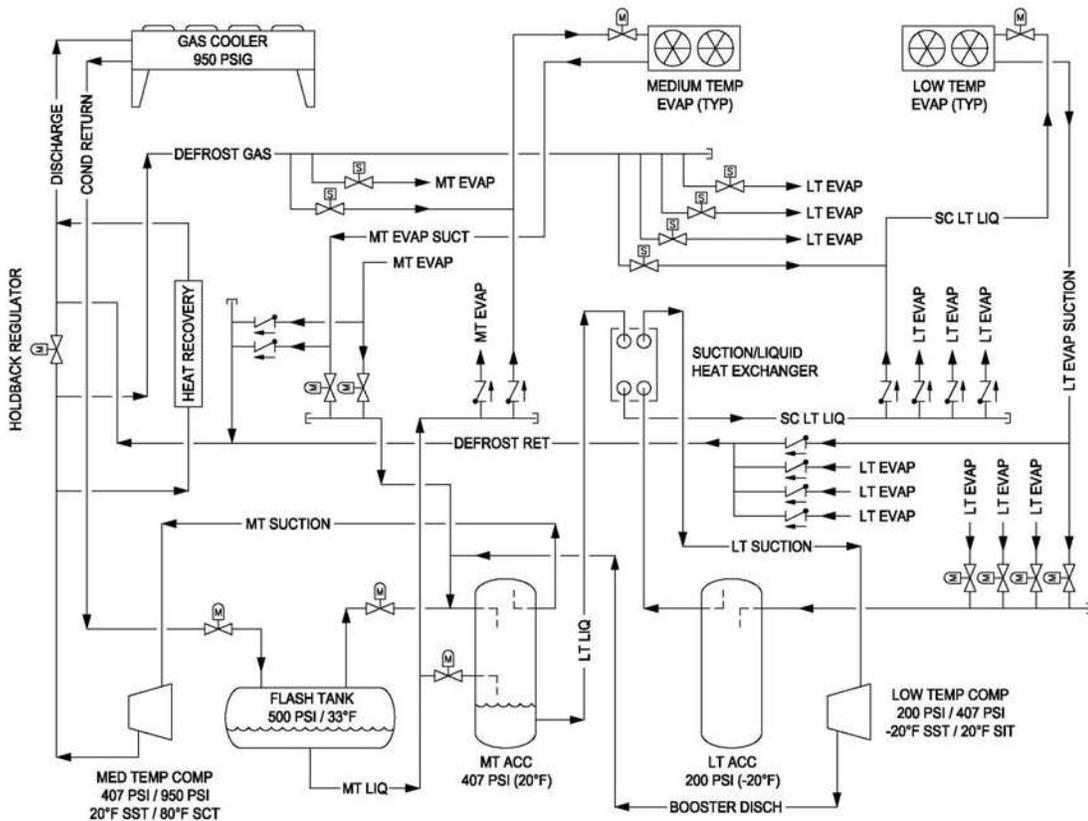
este recipiente se introduce en los compresores de media temperatura (etapa de alta), que normalmente descargan alrededor de 950 psig (65 barg), pero pueden bajar hasta 50 °F/638 psig (10 °C/44 barg), según las condiciones ambientales. Una válvula motorizada (holdback regulator) en la línea de descarga principal sirve para crear una diferencia de presión para que funcione la recuperación de calor y el sistema de desescarce por gas caliente.

El gas a alta presión (y posiblemente transcrito) entra en el enfriador de gas y el gas enfriado se drena al recipiente de vapor saturado a través de una válvula reguladora de presión. Este recipiente es similar a un separador a presión controlada (RPC) en un sistema de amoníaco; se mantiene a aproximadamente 500 psig (34,5 barg) a través de otra válvula reguladora de presión conectada al recipiente de MT ACC.

La válvula reguladora en la entrada del recipiente de expansión es la clave para que el sistema funcione incluso cuando la temperatura de condensación supera los 88 °F/31 °C (1071 psig/73,9 barg). Cuando el CO2 excede estas presiones en el lado de alta, no se puede condensar a líquido (véase el "Punto crítico" en el diagrama de presión/entalpía de CO2 en el Apéndice 4). Cuando un fluido transcrito pasa a través de la válvula reguladora, su presión cae a 500 psig (34,5 barg). En ese momento, una parte se convierte en líquido y el resto se convierte en vapor. El vapor se introduce en el recipiente de MT ACC. Aunque funciona perfectamente, esta no es una situación deseable; durante el funcionamiento transcrito, los compresores de media temperatura manejan una parte de la carga de condensación. Esta situación reduce la eficiencia operativa del sistema.

El líquido en el recipiente de vapor se usa para alimentar los evaporadores de media temperatura (muelle) y el recipiente ACC de MT para enfriar el gas de descarga de los compresores de baja temperatura (booster). La aspiración de los

Figura 1. Esquema simple del sistema de refrigeración



evaporadores del muelle vuelve al recipiente de MT ACC. Al igual que los evaporadores de congelado, los evaporadores del muelle son de expansión directa (DX) con desescarche por gas caliente. Los evaporadores del muelle también incluyen un serpentín de recalentamiento de gas caliente para una deshumidificación adicional.

El líquido del recipiente MT ACC se usa para alimentar los evaporadores del congelador. Primero se canaliza a través de un intercambiador de calor de líquido/vapor contra la aspiración del evaporador del congelador, lo que proporciona un margen de subenfriamiento y ayuda a evitar la aparición de burbujas (flash gas) en la línea de líquido. Las aspiraciones del evaporador del congelador están conectadas al acumulador de baja temperatura (LT ACC). La aspiración seca de este recipiente pasa por el intercambiador de calor líquido/aspiración antes de llegar a los

compresores de baja temperatura, que completa el ciclo.

Todos los desescarches del evaporador son por gas caliente. A diferencia del desescarche por gas caliente con amoníaco, el calor que se utiliza para calentar los serpentines y fundir el hielo es principalmente sensible, no latente. Un calor sensible muy alto es una de las cualidades más útiles del CO₂. En este caso, el gas caliente del lado de alta presión anterior a la válvula motorizada (holdback regulator) se introduce a través de una solenoide en la línea de líquido del evaporador (recordar que cada evaporador tiene sus propias líneas de líquido y aspiración hasta el bastidor del compresor). El flujo de líquido normal se detiene, ya que la presión de desescarche es mucho más alta que la presión del líquido, pero las válvulas de retención evitan que el gas de desescarche retroalimente las líneas de líquido. En el lado de retorno, una válvula solenoide

motorizada se cierra en la línea de aspiración del evaporador y, en cambio, el retorno de desescarche se empuja hacia la línea de descarga principal, aguas abajo de la válvula de motorizada (holdback regulator). Estas líneas de retorno de desescarche también tienen válvulas de retención para evitar que el gas de descarga retroalimente las líneas de aspiración.

PRIMERA COMPARACIÓN DE COSTES

La comparación de costes inicial ofrece la oportunidad de examinar las proyecciones preliminares. La instalación de Grandview se completó en la primavera de 2018 y la puesta en marcha de refrigeración comenzó en mayo. Para el 28 de junio, la instalación estaba abierta al público y recibía productos congelados.

Para dar una idea de la construcción relativa, la nueva instalación de Grandview se compara con una instalación diferente construida por HCS en Salem, Oregón, en 2017, y se la conoce como "Salem II". Las

Comparación de costes de operación entre sistemas de recirculación de CO2 transcrito y amoníaco en un almacén frigorífico

instalaciones son similares en tamaño, operación y métodos de construcción, y ambas fueron construidas por el mismo equipo de contratistas. Salem II tiene alrededor de un 20 % más de espacio refrigerado, por lo que los

dos instalaciones. Los ahorros de costes generales estuvieron cerca del valor previsto, aunque el sistema de refrigeración en realidad costó más de lo esperado. Esto puede deberse a la "curva de aprendizaje"

Entonces, ¿cómo se comparan los costes operativos reales generales de esta instalación con una instalación similar que tiene un sistema de refrigeración de amoníaco recirculado más convencional?

En el momento de redactar este informe, la instalación había estado en pleno funcionamiento durante poco más de seis meses. Esos seis meses incluyen la mayor parte del verano, todo el otoño y la primera mitad del invierno. Es demasiado pronto para hacer afirmaciones absolutas, pero ya hay algunos datos disponibles.

Comenzando con el uso de energía, el modelo preliminar predijo alrededor de un 20 % más de uso de energía para el sistema de CO2 anualmente. Esta cifra se calculó tomando los datos de uso de energía disponibles y extrapolándolos durante un año.

La Figura 3 sugiere que sería razonable suponer que la carga de refrigeración de primavera se aproxima mucho a la carga de otoño, y dado que los datos de uso de energía para el otoño están disponibles, esta suposición se incorporó a una estimación anual. La Figura 3 también muestra que la carga más pequeña ocurre en enero. Los datos de enero de 2019 aún no están disponibles para este modelo, por lo que se utilizan los datos de diciembre, lo que debería proporcionar una predicción conservadora.

Es útil señalar algunas de las características de diseño utilizadas en este sistema para minimizar el uso de energía y ayudar a que el CO2 compita con el NH3 en un sistema industrial grande. El consultor de energía de este proyecto analizó varias mejoras de diseño diferentes y predijo el ahorro de energía y la amortización de cada una. Cada mejora de diseño se conoce como EEM. Todos los EEM calificaron para algún grado de financiación del proveedor de servicios públicos. Entre las EEM elegidas para este proyecto se encuentran

- Recuperación de calor del sistema

Figura 2. Primera comparación de costes NH3 vs. CO2

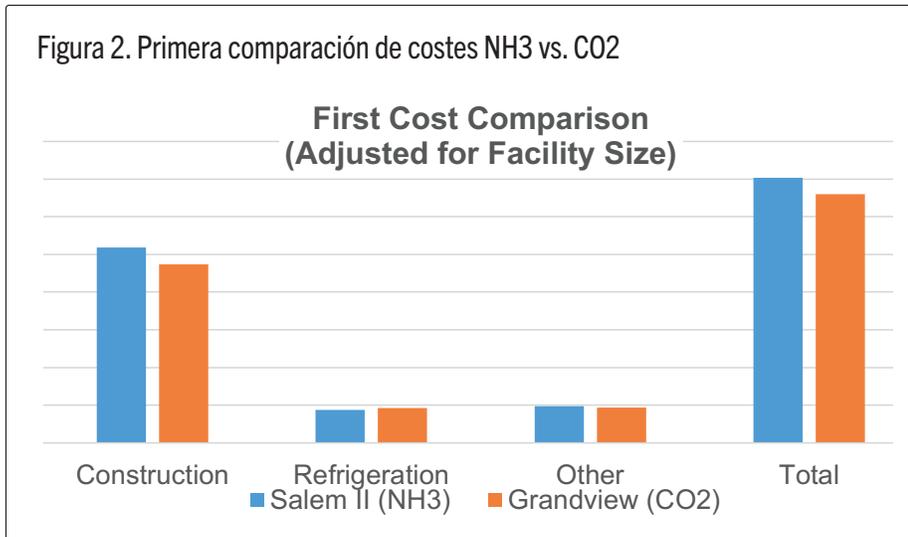
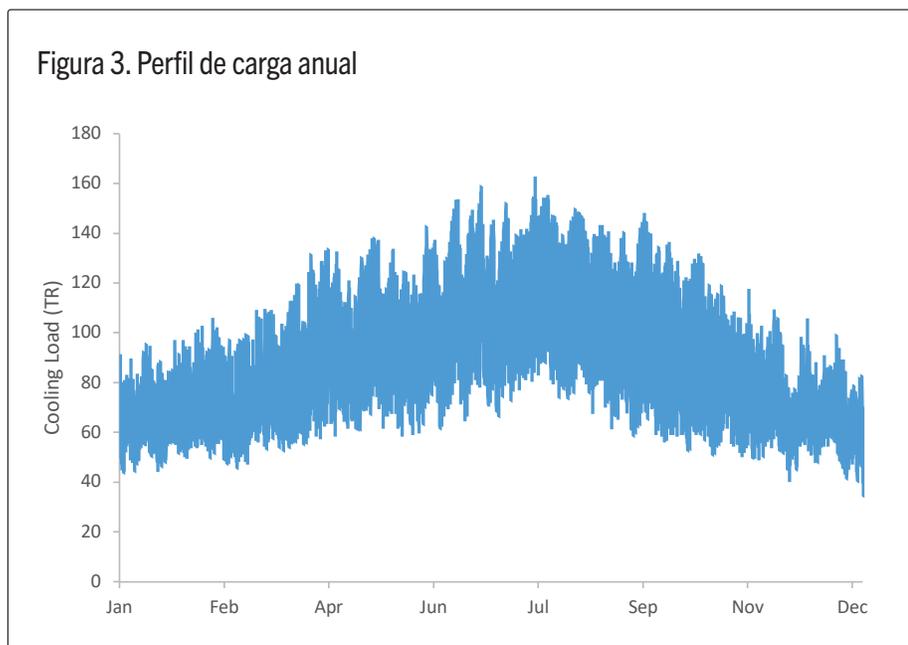


Figura 3. Perfil de carga anual



precios se escalaron para tener esto en cuenta. Los Apéndices 5 y 6 muestran diseños de cada instalación como referencia, y la Figura 2 muestra los valores relativos.

El costo total del proyecto fue aproximadamente un 6 % menor que el de Salem II construido un año antes. Esto es después de ajustar la diferencia de tamaño entre las

del contratista durante la primera exposición a nuevas tecnologías y métodos de construcción. La diferencia real en el costo del proyecto terminado es suficiente para comprar aproximadamente 15 años de electricidad para el sistema de refrigeración de CO2, a las tarifas actuales.

COMPARACIÓN DE COSTES OPERATIVOS

de refrigeración para calefacción por suelo radiante: elimina el costo de la calefacción externa y quita carga al enfriador de gas.

- **Deshumidificación del muelle:** Agregando gas caliente en los serpentines de recalentamiento de los evaporadores del muelle para mantener niveles de humedad bajos en el muelle refrigerado se reduce la carga latente en el túnel de congelados y permite ciclos de desescarche menos frecuentes.
- **Evaporadores de congelados eficientes:** Esta medida aumenta el tamaño del evaporador, mejorando la capacidad sin aumentar la potencia del motor del ventilador conectado.
- **Control óptimo del ventilador del evaporador:** La selección de motores conmutados electrónicamente o EC proporciona una operación más eficiente que los motores de CA. Estos motores también varían la velocidad para mantener los puntos de ajuste de temperatura de la zona. La potencia del motor del ventilador varía con el cubo de la velocidad, por lo que se obtienen importantes ahorros de energía siempre que los evaporadores estén en condiciones de carga parcial. Los motores de los ventiladores del evaporador varían la velocidad del 36 % al 90 % de las RPM máximas del motor.
- **Desescarche por gas caliente para evaporadores:** Utilizar gas caliente para desescarchar los evaporadores en lugar de calor de resistencia eléctrica ofrece ahorros de energía significativos. Aunque el uso del alto calor sensible disponible en CO2 es muy efectivo en líneas de descarga, no se ve a menudo con sistemas transcíticos, ya que requiere evaporadores clasificados para presiones muy altas.
- **Optimización del enfriador de gas (gas cooler):** seleccionar un enfriador de gas con un área de superficie de transferencia de calor adicional permite un intercambio de calor más eficiente. Un sistema adiabático enfría el aire entrante durante el

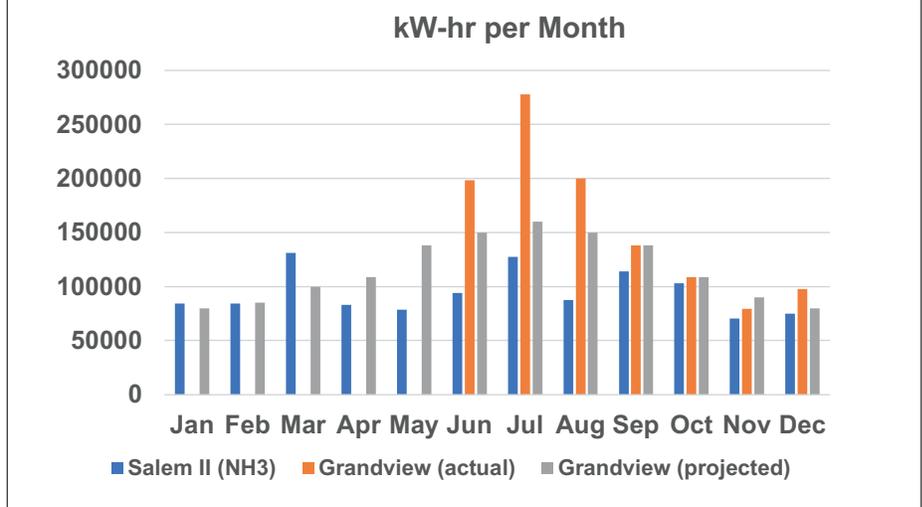
clima más cálido para permitir temperaturas de condensación (o enfriamiento del gas) más bajas, lo que reduce el consumo eléctrico del compresor. Los motores EC también se recomiendan para mejorar la eficiencia y gestionar la capacidad con velocidad variable. Los ventiladores del enfriador de gas varían la velocidad desde el 10 % hasta las RPM nominales máximas del motor. También se incluye una estrategia de presión de condensación flotante para un rendimiento óptimo del enfriador

- **Puertas de túneles de congelados de alta velocidad:** la instalación de puertas de congelador de dos partes aisladas que se abren y cierran rápidamente reducen aún más las cargas sensibles y latentes en el túnel de congelación. Las aperturas de las puertas se activan con sensores de movimiento.

Estos artículos son casi los mismos que en la planta de Salem II, donde se aplican a un sistema de amoníaco recirculado convencional.

La Figura 4 compara el uso de

Figura 4. Comparación del uso de energía



de gas.

- **Calentamiento de montantes de salas contra incendios:** Esta medida comprende la instalación de colectores de cobre glicol sin aislar en cada sala de montantes, para protección contra heladas. Esto elimina la necesidad de calentadores de resistencias eléctricas.

Comparación de costes operativos entre sistemas de recirculación de CO2 transcítico y amoníaco en un almacén frigorífico

- **VFD de bomba de glicol:** el uso de bombas con VFD para variar el flujo en el circuito de glicol basada en el ajuste de temperatura bajo el suelo ahorra energía de bombeo cuando se alcanza la temperatura.

energía entre los dos sistemas, basándose en el pronóstico utilizando los valores de Grandview de enero a mayo de la Figura 3,

Un hecho que destaca rápidamente es la cantidad de energía que utilizó el sistema de CO2 en junio, julio y agosto. Se esperaba que estos fueran los peores meses, pero el uso real superó con creces el valor previsto. Esta anomalía se investigó a fines del verano y se atribuyó a varios EEM que no se implementaron correctamente, incluyendo:

- Las velocidades del ventilador del evaporador eran fijas y no modulantes;
- Se fijaron las velocidades del ventilador del enfriador de gas y no se habilitó la presión de

Comparación de costes de operación entre sistemas de recirculación de CO2 transcrito y amoníaco en un almacén frigorífico

condensación flotante;

- Los desescarches de los evaporadores de congelados actuaban cada 8 horas, en lugar de cada 48 horas como se recomienda (este largo intervalo es posible debido a la deshumidificación del muelle);
- Punto de ajuste de la temperatura de aspiración de baja a -25 °F (-32 °C) en lugar del recomendado -17°F (-27°C);
- Punto de referencia de aspiración

de temperatura intermedia a +19 °F (-7 °C) en lugar de +25 °F (-4 °C); y

- El VFD de la bomba de glicol de suelo sin habilitar.

Una vez que se acoplaron adecuadamente estos elementos, el uso de energía comenzó a parecerse más a los valores predichos. El uso de energía del sistema de CO2 ha sido muy similar al del sistema de NH3 desde la “reactivación”. Queda por ver cuál será el efecto durante los meses de clima cálido.

Debe tenerse en cuenta que las cifras de energía reflejan el uso de toda la instalación, porque la energía del sistema de refrigeración no se mide por separado. La “mejor proyección” actual es que el sistema de CO2 utilizará alrededor de un 22 % más de energía que el sistema de NH3, aproximadamente el valor previsto del 20 %.

Los valores aparentemente inconsistentes para el uso de energía de Salem II se atribuyen al período de recopilación de datos (no siempre la misma cantidad de días para el mes) y la posibilidad de que algunos meses puedan ser “promediados”, en lugar de mediciones verdaderas.

Una ventaja clave del sistema de CO2 en esta comparación es su menor uso de agua. Incluso con un enfriador de gas adiabático, utiliza mucha menos agua que un sistema convencional de NH3 con condensador evaporativo. Tampoco hay necesidad de tratamiento químico. La Figura 5 muestra el uso de agua para las dos instalaciones.

El uso de agua fue insignificante en mayo porque el sistema se estaba iniciando y había muy poca carga. Junio y julio son más altos de lo esperado, pero aún menores que el sistema NH3 (los valores se han escalado para los tamaños relativos de las instalaciones). Después de volver a poner en servicio a fines de agosto, el uso real de agua se alineó con los valores previstos.

Cuando el clima se volvió más frío a fines del otoño, el uso de agua se redujo prácticamente a cero ya que el enfriador de gas permaneció funcionando en seco en todo momento.

El uso de energía y agua son métricas de rendimiento muy importantes para el almacenamiento en frío, pero no son los únicos factores. Examinar los dos sistemas en discusión brinda la oportunidad de comparar los costes operativos de las dos instalaciones e investigar el costo real de propiedad en un sistema de refrigeración de CO2 versus un sistema de NH3 convencional.

Debido a que Salem II es una

Figura 5. Uso de agua (1 CCF = 100 pies cúbicos de agua = 748 gal)

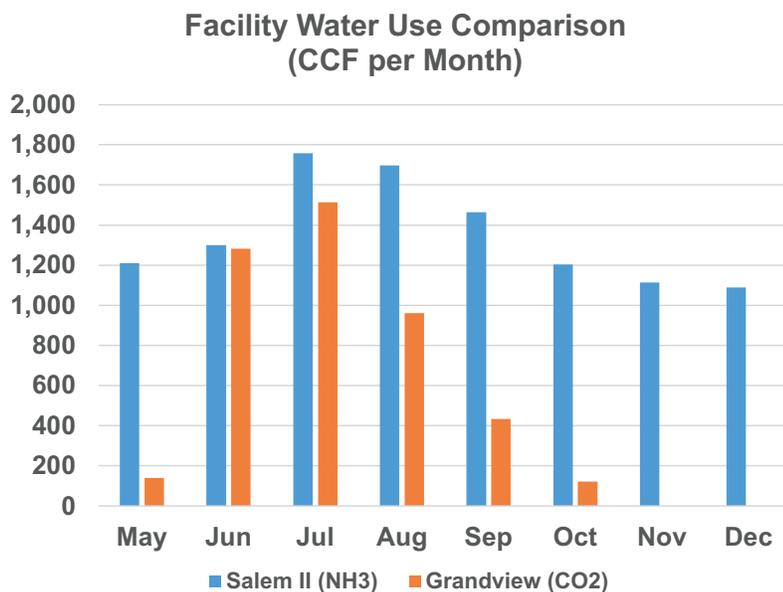
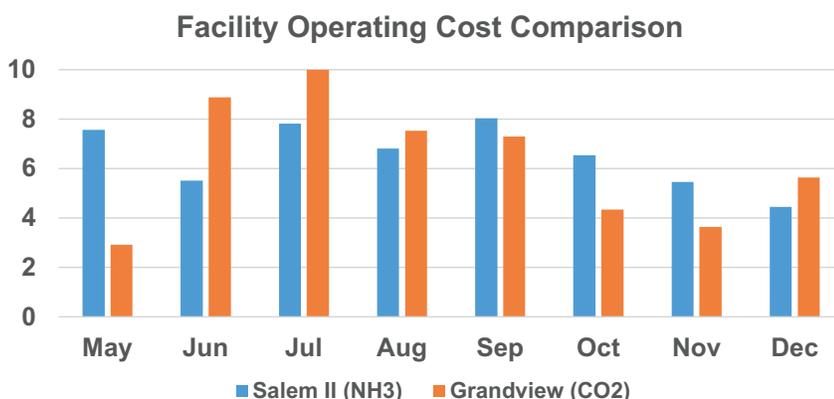


Figura 6. Comparación de costes de operación



instalación más grande, los costes se escalaron proporcionalmente, con pies cúbicos de espacio refrigerado. El uso de energía se escaló de manera similar para proporcionar una comparación justa, y se ignoraron los costes no relacionados con la refrigeración. Considerando también estos factores, y utilizando un divisor aleatorio en el costo real para proteger la información financiera confidencial, se puede desarrollar una comparación de costes operativos (Figura 6).

Los datos de mayo de las instalaciones de Salem II son una aberración; fue entonces cuando comenzó la puesta en marcha y el desmontaje de las instalaciones de Grandview. A finales de junio, Grandview estaba en pleno funcionamiento y los datos comienzan a tener sentido. Para junio y julio, los costes operativos de Grandview son más altos que los de Salem II. Recuérdese, sin embargo, que el sistema Grandview aún no se había puesto en servicio correctamente para lograr la máxima eficiencia; esto no se hizo hasta casi finales de agosto. El impacto de la actualización se ve de inmediato. A partir de octubre, la instalación de Grandview está operando a un costo más bajo que Salem II. Esta tendencia se revierte ligeramente en diciembre, debido al mantenimiento de refrigeración trimestral realizado por un proveedor externo.

El punto más importante de este análisis es que durante los siete meses con datos significativos, la instalación de CO2 tiene un costo operativo general ligeramente superior (alrededor del 6 %) que la instalación de amoníaco. Este análisis cuenta solo los costes que afecta el sistema de refrigeración y se normaliza para tener en cuenta las diferencias de tamaño entre las instalaciones. La energía cuesta aproximadamente un 8,5 % más en Salem que en Grandview, pero el agua y los costes relacionados son aproximadamente un 60 % más altos en Grandview que en Salem.

También se debe considerar que los datos preliminares que sugieren un

costo 6% más alto para la instalación con un sistema de CO2 se basan en los primeros siete meses de operación. Estos incluyen los tres meses más calurosos del año, y durante casi todo ese tiempo el sistema de CO2 funcionó de manera subóptima. Con ese problema corregido y meses más fríos por delante (de enero a mayo), se espera que el sistema de CO2 en Grandview resulte en un costo anual entre un 5% y un 10% más bajo que un sistema de amoníaco comparable y altamente eficiente.

CONCLUSIONES

Con menos de un año completo de operación en Grandview, es difícil llegar a conclusiones con un 100 % de certeza. Sin embargo, según los datos actualmente disponibles, los puntos clave son los siguientes:

- Dependiendo del clima, que un sistema de CO2 tenga un costo operativo más bajo que un sistema de NH3 convencional es completamente factible. La clave para determinar esto probablemente es la humedad, o la temperatura de diseño de bulbo húmedo. Las instalaciones que se comparan en este documento se encuentran en climas con temperaturas de diseño de bulbo húmedo similares (alrededor de 68 a 69 °F o 20 °C). Un sistema transcrito con un enfriador de gas adiabático de tamaño generoso podrá condensar por debajo del punto crítico en casi todo momento.
- El sistema de CO2 usará más energía en los meses de verano, pero aproximadamente lo mismo que el sistema de NH3 en los meses más fríos.
- La clave para la eficiencia del sistema de CO2 es la puesta en marcha adecuada, que potencialmente puede reducir el consumo de energía en un 50% o más. Por lo tanto, la capacitación de operadores y técnicos es vital.
- El sistema de CO2 usará mucha menos agua que el sistema de NH3 (aunque, para ser justos, es posible instalar un sistema de NH3 con

un condensador adiabático similar al enfriador de gas del sistema de CO2).

- Una instalación con un sistema de CO2 se puede construir significativamente más rápido que una instalación del mismo tamaño con un sistema de NH3 (5 a 6 semanas en este caso).
- El proceso de obtención de permisos suele ser más fácil para un sistema de CO2 en comparación con un sistema de NH3.
- Para competir con un sistema de NH3 moderno y eficiente, un sistema de CO2 debe tener un enfriador de gas adiabático, motores de velocidad variable para todos los ventiladores y desescarche por gas caliente.
- Se puede colocar un rack de compresores de CO2 en el exterior si es necesario, permitiendo que el CO2 sea una opción para la ampliación de las instalaciones en las que la sala de máquinas está al límite o situada de manera inconveniente para futuras ampliaciones.
- El retorno de inversión puede mejorar reforzando la recuperación de calor.
- Una fuga en un almacén de refrigerados con CO2 no dañara necesariamente el producto. Esto puede suponer una ventaja competitiva, puesto que los clientes de los almacenes frigoríficos tendrán un menor riesgo de que el producto se estropee y, presumiblemente, tendrán mejores tarifas de seguro en comparación con las de producto que va a un almacén frigorífico de amoníaco.

Para los grupos que están considerando la construcción de un nuevo almacén refrigerado o la ampliación de una instalación existente, el CO2 debería ser una consideración entre las opciones de refrigeración natural. Dependiendo de la climatología, el CO2 puede ser igual o superior al Amoníaco en términos de seguridad, uso de agua y coste total de funcionamiento.

Comparación de costes de operación entre sistemas de recirculación de CO2 transcrito y amoniaco en un almacén frigorífico

REFERENCIAS:

International Code Council. International Fire Code. ICC, 2018: Washington, D.C. International Institute for Ammonia Refrigeration. ANSI IAR 2 "Standard for Safe Design of Closed-Circuit Ammonia Refrigeration Systems." IAR, 2014: Alexandria, VA.

Owen MS, ed. "2017 ASHRAE Handbook-Fundamentals." ASHRAE, 2017: Atlanta, GA. Washington State Building Code Council. Washington State Energy Code (WSEC 2015). WSBBC, 2015: Olympia, WA.

APÉNDICE 1. ÍTEMS DE ANÁLISIS

COMPARATIVOS

CO2 Transcrito vs NH3 Sistemas de refrigeración compacto y centralizado

(1) Costes iniciales

- a. CO2 vs NH3. Comparativa de costes directos del sistema
- b. Eliminación del ahorro en la construcción de la sala de máquinas
- c. Espacio añadido para la central de compresores
- d. Estructura de soporte añadida para la central de compresores
- e. Eliminación de la suportación de tuberías del techo
- f. Agregar la suportación de tuberías en interior
- g. Eliminación del sistema PRV
- h. Eliminación del sistema de ventilación de la sala de máquinas
- i. Sistema preparado para futuros incrementos de potencia o añadir servicios

(2) Energía y utilidades

- a. Comparativa anual de consumos en kWh
- b. Comparativa de coste de demanda anual
- c. Comparativa de uso de agua anual
- d. Comparativa de coste del tratamiento de agua
- e. Disponibilidad, cantidad y la calidad de recuperación de calor.
 - i. Uso dentro de las instalaciones, calefacción de suelo, deshumidificador de muelles, otros;
 - ii. Conveniencia para la venta, como fuente de ingresos.

Comparativa de coste de operación entre CO2 Transcrito y Sistemas de Recirculación de Amoniaco en un

almacén frigorífico

(3) Mantenimiento y operaciones

- a. Costes de sustitución de compresor frente a costes de revisión.
- b. Comparativa de costes del refrigerante.
- c. Consideraciones de disponibilidad e inventario de repuestos.
- d. Horas de trabajo al año para actividades de PM
- e. Horas de trabajo al año para actividades de mantenimiento predictivo.
- f. Reparaciones por horas de funcionamiento al año.
- g. Comparativa de número de puntos de fuga (válvulas, juntas, bridas, sellos de ejes).

(4) Fiabilidad

- a. Esperanza de vida del compresor.
- b. Efecto de fallo de compresor.
- c. Efecto de pérdidas de refrigerante.
- d. Efecto de fallo de sistema de control.
- e. Efecto de fallo del ventilador de la unidad.
- f. Efecto de pérdida de agua.

(5) Programación

- a. Velocidad de construcción.
- b. Trabajos de integración con otras actividades de construcción.

(6) Regulación

- a. Costes de cumplimiento del PSM de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional.
- b. Coste del cumplimiento del RMP de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.
- c. Costes de un lanzamiento principal.
 - i. Personal interno.
 - ii. Producto interno.
 - iii. Personal externo.
 - iv. Exterior, medioambiente.
- d. Consideraciones de seguridad química del Departamento de Seguridad Nacional.
- e. Consideraciones sobre informes de nivel II.

Propietario: Henningsen Cold Storage

Instalación: Cold Storage

Ubicación: Grandview, WA

Asunto: Uso de energía proyectado para el NH3 frente al CO2 e incentivos estimados de la compañía eléctrica para la operación de alta eficiencia.

Información general: Henningsen Cold Storage (HCS) construyó recientemente una nueva instalación de almacenamiento en frío en Grandview, WA, para almacenar aproximadamente 20.000 compartimentos de palés americanos. La instalación consiste en 9.197,4 m² de espacio para congelados a -15°C y 1.021,93 m² de espacio de muelle refrigerado a +4°C. El emplazamiento cuenta con uno o más turnos por día, pero el sistema de refrigeración funciona las 24 horas del día durante un total de 8.760 horas al año.

Se llevó a cabo un estudio energético detallado, financiado por la compañía eléctrica, para analizar y cuantificar el ahorro de energía asociado a las actualizaciones a un CO2 transcrito. Se utilizó el Código Energético del Estado de Washington (WSEC 2015) como guía para el análisis energético; aunque no se aplica a los sistemas de refrigeración transcrito de CO2.

Metodología: Al tratarse de un almacén frigorífico, las cargas dependen en gran medida de las condiciones meteorológicas, con cargas máximas que se producen en los meses de verano. Al mismo tiempo, la instalación también se utiliza para las cargas de enfriamiento estacionales de fruta, concretamente de arándanos. Al tratarse de un proyecto de nueva construcción, no fue posible el registro de datos para el estudio energético. La carga anual de refrigeración se determinó más bien a partir de cálculos de transferencia de calor basados en la construcción de la envoltura del edificio, las especificaciones del equipamiento y las conversaciones con HCS.

Se desarrolló (a partir del conjunto de datos TMY3 del Laboratorio Nacional de Energías Renovables del Departamento de Energía de EE.UU) un modelo energético personalizado

en MS Excel utilizando los 8.760 datos de un año meteorológico típico de Yakima, WA, para calcular el uso de energía para el caso de referencia y para cada medida de eficiencia. Donde se aplique esto, se incluye lo siguiente:

- Conducción a través de la envoltura del edificio;
- Carga solar en el tejado;
- Cargas de infiltración;
- Cargas de calor internas;
- Energía de calefacción de suelo;
- Energía de bombeo para la calefacción de suelo;
- Cargas de calefacción para la sala de rociadores;
- Cargas por ganancia de calor de desescarche en los espacios

Apéndice 3. Comparación y Análisis energético preliminar de HCS por Energy 350.

	NH ₃	CO ₂	HFC
¿Qué ocurre si tenemos una fuga fatal y se pierde la mayor parte de nuestro refrigerante al aire libre?	<p>Medioambiental: Posible consecuencia en el exterior, reportar a NRC.</p> <p>Seguridad: Posibilidad de que el personal cercano y de HCS resulten heridos.</p> <p>Financiero: Multas potenciales de los reguladores. Costos relativamente bajos para reemplazar la carga.</p>	<p>Medioambiental: sin impactos externos, sin requisitos de informes</p> <p>Seguridad: No hay riesgo para los vecinos y el personal de HCS</p> <p>Financiero: Sin multas, Bajos costos por cargo de reposición.</p>	<p>Medioambiental: Posibles consecuencia en el exterior. Puede que tenga que informar a la NRC.</p> <p>Seguridad: Bajo riesgo para el personal cercano y de HCS.</p> <p>Financiero: Posibles multas de los reguladores, bajo costo para reemplazar la carga</p>
Qué ocurre si falla un compresor?	<p>Capacidad: gran efecto sobre la capacidad del sistema (100%), requiere la instalación de un compresor redundante.</p> <p>Financiero: Los compresores de tornillo de tamaño industrial son muy caros de sustituir, entre 35.000 y 55.000 dólares.</p> <p>Operativo: Tiempo de inactividad prolongado para conseguir un compresor de repuesto e instalarlo. No hay existencias locales. Más complejo de instalar con coste entre 35.000 y 55.000 dólares.</p>	<p>Capacidad: Efecto menor en el sistema (17%), se instalan varios compresores paralelos para cada etapa.</p> <p>Financiero: Bajo impacto financiero, reemplazo del compresor \$10k - \$13k.</p> <p>Operativo: Breve tiempo de inactividad, compresores de reemplazo almacenados en el distribuidor local. Instalación relativamente fácil</p>	<p>Capacidad: Gran efecto en el sistema (50%), sólo uno o dos compresores suelen estar instalados por sistema. No se dispone de capacidad de reserva.</p> <p>Financiero: Bajo impacto financiero, el compresor de colocación cuesta 10.000 dólares - 20.000 dólares.</p> <p>Operativo: tiempo de inactividad prolongado para obtener un compresor de repuesto y su instalación. No almacenado localmente. Instalación relativamente fácil.</p>
¿Qué ocurre si perdemos el agua de refrigeración en un día caluroso?	Efecto negativo importante en la capacidad, probable pérdida total de refrigeración. Los condensadores evaporativos necesitan agua para funcionar	Efecto negativo menor en la capacidad. El sistema funcionaría en modo transcrito con un mayor consumo de energía. El gas cooler puede funcionar en seco o con asistencia adiabática.	Sin efecto sobre la capacidad. Sin efecto sobre la energía, por lo general estos sistemas usan condensación seca.
Cuáles son los/ las cargas de cumplimiento normativo?	La cláusula de obligación general de EPA y PSM es muy alta, notificable de nivel II, exige un sistema de gestión robusto independientemente de la carga.	Sin informes de fugas o escapes, sin programas Tier II, RMP o SM de la EPA.	Medio, notificable de nivel II, la cláusula de deberes generales de la EPA y M obliga a un sistema de gestión de roturas independientemente de la carga.

Comparación de costes de operación entre sistemas de recirculación de CO2 transcrito y amoníaco en un almacén frigorífico

- refrigerados;
- Ventilador y calor del motor del evaporador;
- Presión de alta como función de las especificaciones del gas cooler, estrategia de control y las condiciones del aire exterior;
- Carga de rechazo de calor, que se determinó por la carga de refrigeración y el calor del compresor;
- Rendimiento del compresor para un rango de presiones de aspiración, presiones de alta y las condiciones de carga parcial para las máquinas de velocidad variable, basándose en los análisis de regresión multivariable.

Perfil de Carga Anual

Detalles del Sistema: El sistema de refrigeración transcrito de CO2 consiste en un diseño de central de compresores de dos etapas. Todos los compresores son semi-herméticos. Un compresor en cada grupo de aspiración se controla con un VF para el ajuste. Todos los compresores de velocidad constante realizan un ciclo de encendido y apagado para mantener la aspiración. Los grupos de baja y la de alta funcionan a presiones de aspiración de 212 psig y 441 psig, respectivamente.

Debido a las altas temperaturas de descarga del compresor, el bajo volumen específico y la alta conductividad del refrigerante de CO2, el sistema es adecuado para la recuperación del calor residual. El sistema incluye un intercambiador de calor de gas caliente de CO2 que envía una parte de la descarga de gas caliente de los compresores a los serpentines de recalentamiento y a los circuitos de desescarche por gas caliente del evaporador del muelle. El gas caliente también se utiliza para calentar el glicol del sistema de calefacción de suelo y para proteger de la congelación a los rociadores de las salas.

Un gas cooler adiabático disipa cualquier carga de calor que supere las aplicaciones de recuperación de calor. Es capaz de funcionar de forma subcrítica o supercrítica. A diferencia de un condensador típico, cuando

funciona de forma supercrítica, el gas cooler puede disipar el calor sensible a presión constante. La presión mínima de alta se controla a 638 psig para el sistema. Aunque el agua se consume en modo adiabático, el sistema permite un gran ahorro de agua, desagües y tratamiento químico en comparación con un condensador evaporativo.

Se incluyen seis evaporadores de congelación y dos evaporadores en el muelle. Los ciclos de desescarche de los evaporadores se inician según un horario definido por el operador. Junto con el equipo de refrigeración viene un sofisticado sistema de control capaz de controlar la velocidad del ventilador del evaporador y del gas cooler, la estrategia de presión de condensación flotante, la secuenciación del compresor, el control de la bomba de glicol variable, y el control del calentamiento del muelle.

Medidas de Eficiencia Energética: Para este estudio se analizaron las siguientes medidas de eficiencia energética:

Deshumidificación del muelle: Se añaden serpentines de gas recalentado en los evaporadores del muelle para mantener bajos niveles de humedad en el muelle refrigerado, reduciendo la carga latente en el túnel de congelados y permite ciclos de desescarche menos frecuentes.

Evaporadores de congelación eficientes: Esta medida aumenta el tamaño del serpentín del evaporador, incrementado la capacidad sin aumentar la potencia del motor del ventilador conectado.

Control óptimo del ventilador del evaporador: La selección de motores EC proporciona un funcionamiento más eficiente que los motores AC. Estos motores también varían la velocidad para mantener los puntos de ajuste de la temperatura de la zona. La potencia del motor varía con el cubo de la velocidad, con lo que se consigue un importante ahorro de energía siempre que los evaporadores estén en condiciones de carga parcial. Los motores de los ventiladores del evaporador varían la velocidad

entre el 36% y el 90% de las RPM máximas del motor.

Optimización del gas cooler: Seleccionar un gas cooler con una superficie de transferencia de calor adicional permite una disipación de calor más eficiente. Una mejora adiabática para enfriar el aire entrante durante el tiempo más caluroso permitiendo temperaturas de condensación (o de gas) más bajas, reduce el desplazamiento del compresor. También se recomiendan los motores EC para mejorar la eficiencia y la capacidad con velocidad variable. Los ventiladores del gas cooler varían la velocidad desde el 10% hasta las RPM máximas del motor. También se incluye una estrategia de presión de condensación flotante para un rendimiento óptimo del gas cooler.

Calefacción de las salas de rociadores: Esta medida consiste en la instalación de colectores de glicol no aislados en cada una de los montantes de salas, eliminando así la necesidad de calentadores eléctricos.

VFD de la bomba de glicol: El uso de un VFD en la bomba para la variación del flujo en el circuito de glicol, basado en el ajuste de la temperatura bajo el suelo, ahorra energía de bombeo cuando se satisfagan las temperaturas.

Puertas de túneles de congelación de alta velocidad: La instalación de puertas aisladas y bipartidas que se abren y cierran rápidamente reduce aún más las cargas sensibles y latentes en el congelador. Las aperturas de las puertas se activan con sensores de movimiento.

Resultados del modelo energético: El estudio energético cuantificó el ahorro de energía analizando las actualizaciones del sistema de refrigeración de CO2, es decir, se comparó un sistema básico de CO2 con un sistema de CO2 altamente eficiente. El estudio energético también sirvió para estimar los incentivos financieros para compensar la amortización simple y mejorar el rendimiento de la inversión. El ahorro energético total de cada medida de eficiencia se presenta en

la siguiente tabla. Los incentivos se basan en los costes subvencionables y se pagan sobre la base de \$/kWh o de un porcentaje del coste total del proyecto, el menor de los dos. Dado que este estudio energético se basa en un proyecto de nueva construcción, los costes subvencionables representan la diferencia entre un caso de referencia y una opción de alta eficiencia, no el coste total del proyecto. Tenga en cuenta que, en el momento de redactar este documento, los siguientes cálculos de ahorro son estimaciones y están pendientes de verificación.

Para este trabajo, también se realizó una comparación con otros tipos de sistemas, un sistema de halocarbonos y un sistema de NH3.

El uso de energía del sistema de halocarbonos se modeló junto con el sistema de CO2. El uso anual de energía para cada componente de refrigeración se calculó de la misma manera: construyendo un modelo de refrigeración base para predecir la carga de refrigeración para cada hora de un año climático típico y utilizando los datos de rendimiento del fabricante para estimar el uso de energía. No es de extrañar que se trate de un sistema ineficiente en comparación, pero típico en los equipos. Gran parte de la ineficacia se debe a los controles simplistas y a la falta de recuperación de calor. Este sistema consistía en lo siguiente:

- Unidades condensadoras compactas y refrigeradas por aire con refrigerante R507;
- Evaporadores de aire con tuberías a distancia y desescarche eléctrico;
- Ventiladores del evaporador que funcionan continuamente, excepto durante los ciclos de desescarche programados;
- Calefacción eléctrica de suelo; y
- Controles sencillos.

La reciente instalación de HCS construida en Salem, OR, conocida como S2, se utilizó para comparar el sistema de amoníaco, ya que este sitio representa el diseño de NH3 más avanzado de HCS hasta

la fecha. Recientemente se ha verificado el uso anual de energía del sistema de refrigeración en este sitio financiado por un programa de eficiencia similar respaldado por una empresa de servicios públicos. Una vez más, la gran cantidad de datos disponibles hizo que este sitio fuera una buena selección para la comparación. Se calculó una métrica para el uso anual de energía por volumen acondicionado y se aplicó a las instalaciones de Grandview para estimar el consumo de energía del sistema NH3. El sistema NH3 incluye las siguientes características:

- Compresores de tornillo con economizador, uno de ellos con VFD;
- Refrigeración del aceite del compresor de alta eficiencia;
- Control del índice volumétrico variable y automatizado;
- Condensador evaporativo;
- Subenfriador de líquido;
- Evaporadores con tuberías remotas y desescarche por gas caliente;
- Aeroenfriadores en muelle con serpentines calientes de alimentación de glicol para la deshumidificación;
- La recuperación de calor se utiliza para la calefacción del suelo, la protección contra la congelación en las salas de rociadores y el desescarche de los evaporadores;
- Motores del ventilador del evaporador y del condensador con velocidad variable;
- Intercambiadores de calor de tamaño óptimo (evaporadores y condensadores);
- Evaporadores inundados con baja sobrealimentación para minimizar la carga de NH3;
- Drenadores de líquido; y
- Un sofisticado sistema de control capaz de secuenciar el compresor de forma dinámica, iniciar y finalizar el desescarche en función de la demanda, controlar la velocidad del ventilador, y

presiones de aspiración y de

descarga flotantes.

Resumen del Sistema

Sistema R507: 2.620.859 kWh/año

Sistema de NH3: 717.652 kWh/año

Sistema de CO2: 868.462 kWh/año

Además de la energía, se obtienen

otros ahorros. Por ejemplo, el sistema

de CO2 se basa en un gas cooler

adiabático (con una temperatura de

conmutación de 22 °C) en lugar de un

condensador evaporativo que suele

encontrarse en el NH3 industrial.

Las siguientes estimaciones se basan

en 3 gpm/100 TR y 3,0 ciclos de

concentración para la purga de un

condensador evaporativo.

Comparación de costes de operación entre sistemas de recirculación de CO2 transcrito y amoníaco en un almacén frigorífico

Apéndice 4. Diagrama Presión-Entalpía del CO2

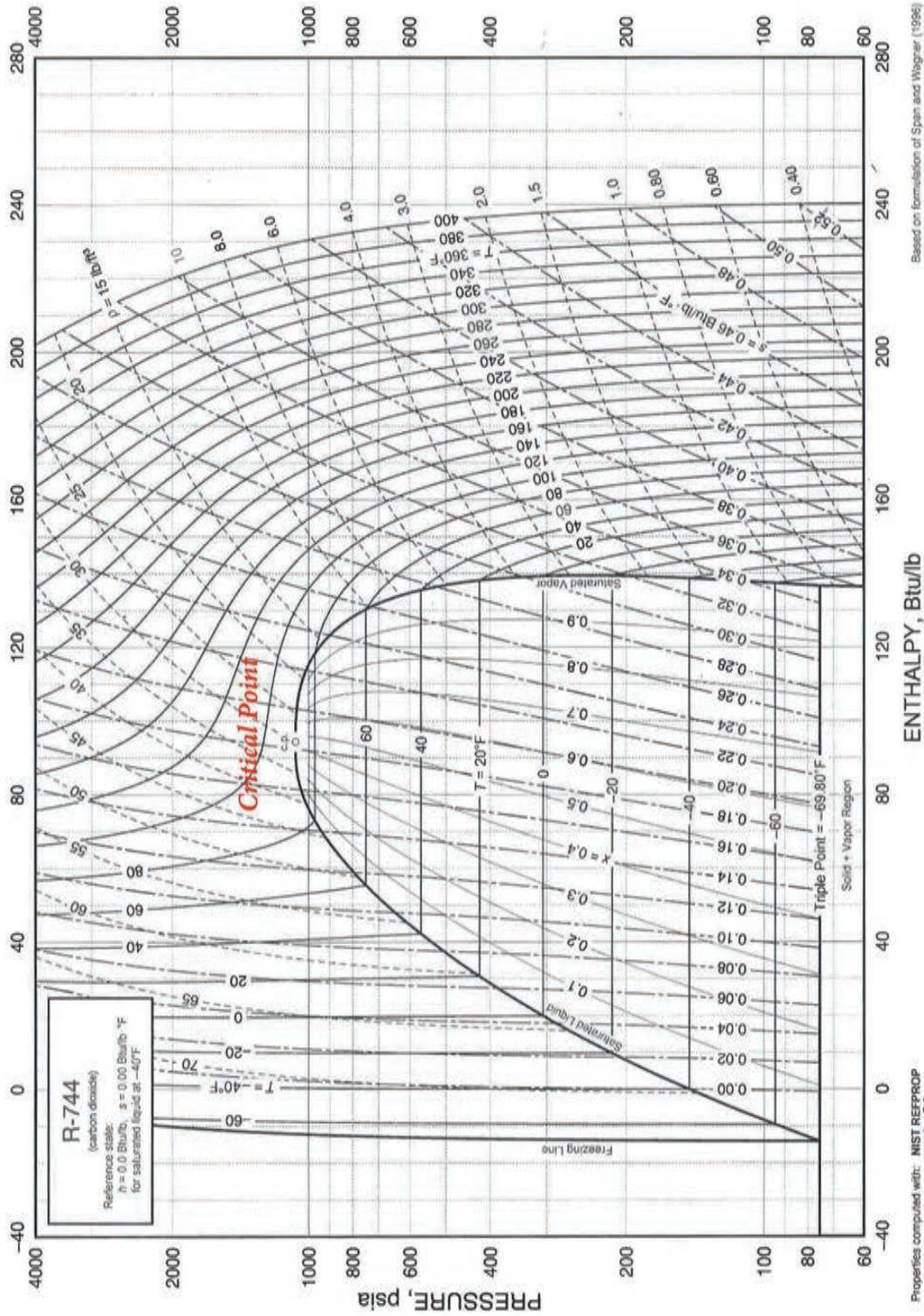
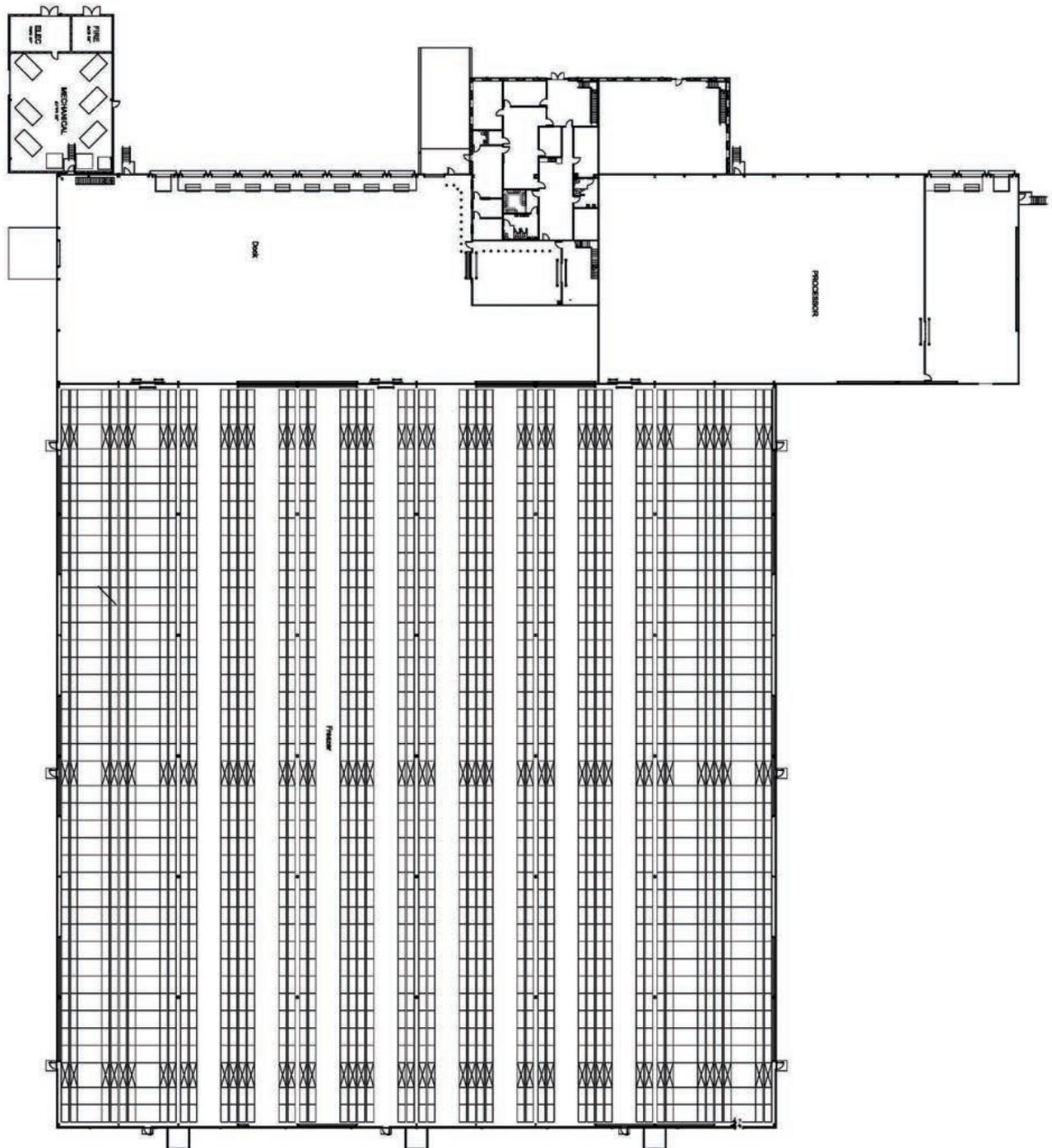


Fig. 18 Pressure-Enthalpy Diagram for Refrigerant 744 (Carbon Dioxide)

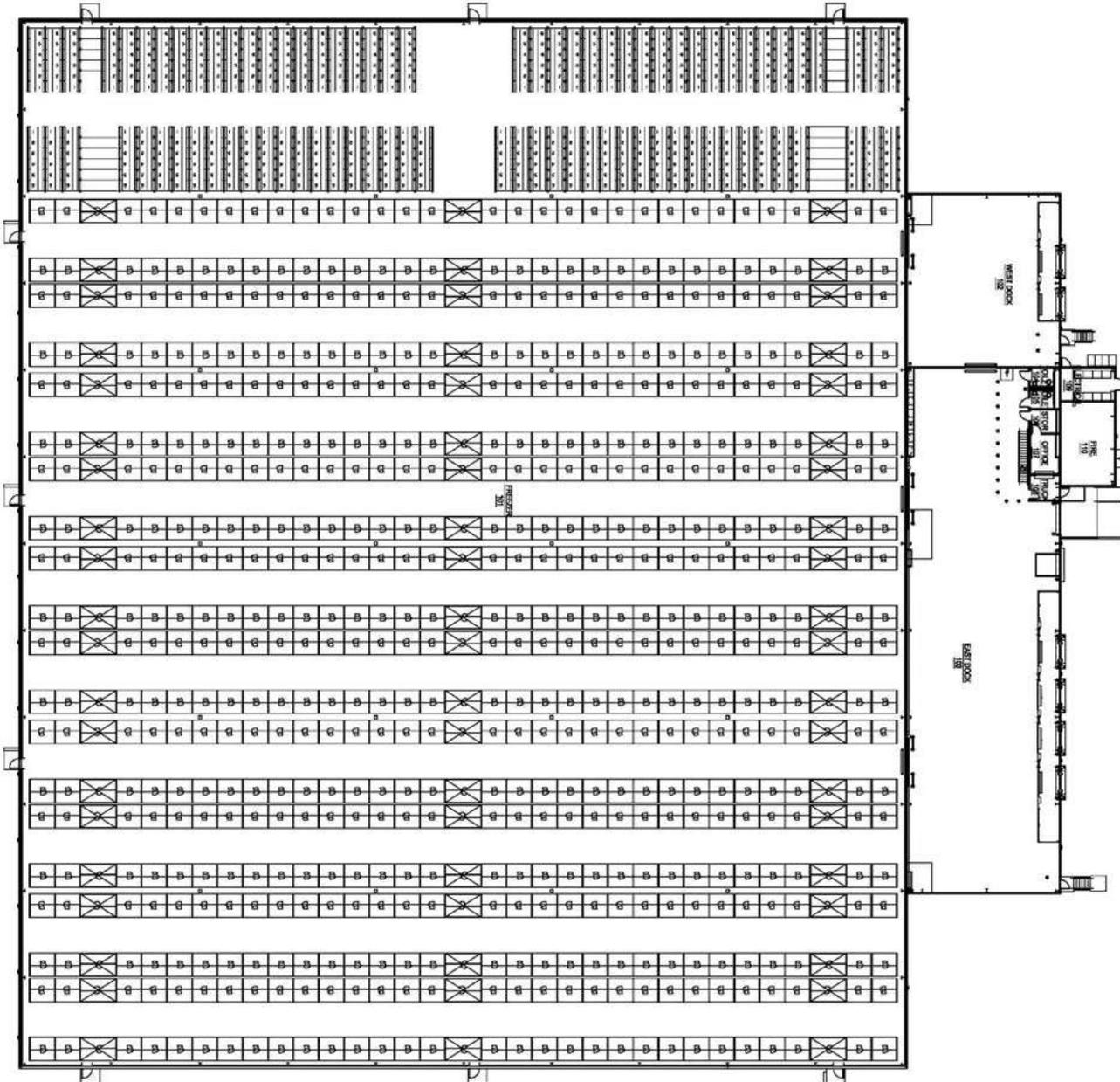
Fuente: ASHRAE (2017)

Apéndice 5. Esquema de las instalaciones Salem II



Comparación de costes de operación entre sistemas de recirculación de CO2 transcrito y amoníaco en un almacén frigorífico

Apéndice 6. Disposición de las instalaciones de Grandview



Apéndice 7. Datos meteorológicos de ASHRAE para Salem

Meaning of acronyms:
 DB: Dry bulb temperature, °F
 WB: Wet bulb temperature, °F
 MCBW: Mean coincident wet bulb temperature, °F
 DP: Dew point temperature, °F
 MCDB: Mean coincident dry bulb temperature, °F
 Long: Longitude, °
 HR: Humidity ratio, grains of moisture per lb of dry air
 HDD and CDD 65: Annual heating and cooling degree-days, base 65°F, °F-day
 Elev: Elevation, ft
 WS: Wind speed, mph
 HR: Humidity ratio, grains of moisture per lb of dry air
 HDD and CDD 65: Annual heating and cooling degree-days, base 65°F, °F-day

Licensed for single user, © 2009 ASHRAE, Inc.

Station	Lat	Long	Elev	Heating DB		Cooling DB/ACWB				Evaporation WB/MCDB				Dehumidification DP/HR/MCDB				Extreme Annual WS		Heat/Cool. Degree-Days HDD / CDD 65						
				99.6%	99%	0.4%		1%		0.4%		1%		0.4%		1%		1%	2.5%		5%					
						DB / MCWB	DB / MCWB	WB / MCDB	WB / MCDB	DP / HR / MCDB	DP / HR / MCDB	DP / HR / MCDB	DP / HR / MCDB	DP / HR / MCDB	DP / HR / MCDB	DP / HR / MCDB	DP / HR / MCDB					DP / HR / MCDB				
North Dakota																										
BISMARCK MUNICIPAL ARPT	46.77N	100.75W	1660	-20.0	-13.9	93.9	69.4	90.3	68.6	86.8	67.4	74.3	85.8	71.9	84.5	70.7	120.4	81.4	68.0	109.3	78.3	27.3	24.4	20.8	8471	539
FARGO HECTOR INTERNATIONAL AP	46.93N	96.81W	899	-20.4	-15.2	91.0	72.1	87.7	70.3	84.7	68.8	75.4	85.4	73.4	83.6	72.4	123.9	81.8	70.0	113.9	80.1	28.3	25.4	23.1	8793	553
GRAND FORKS AFB	47.97N	97.40W	906	-20.4	-15.8	90.8	71.3	87.2	70.1	84.2	68.3	75.0	84.7	73.6	82.5	71.8	121.0	80.0	71.4	119.9	78.8	28.3	25.3	22.9	9167	477
GRAND FORKS INTERNATIONAL AP	47.95N	97.18W	833	-20.2	-17.2	90.0	71.0	86.6	69.4	83.7	68.0	75.0	84.7	73.2	82.5	71.8	121.0	81.2	69.4	111.3	78.9	26.9	24.2	20.9	9310	434
MINOT AFB	48.42N	101.35W	1631	-22.2	-17.3	93.2	68.6	89.3	67.8	85.6	66.5	73.1	86.3	70.8	83.5	69.4	114.9	79.9	66.4	103.2	77.1	28.9	25.9	22.6	9097	433
MINOT FAA AP	48.26N	101.28W	1713	-19.9	-15.0	91.4	68.9	88.0	68.1	84.3	66.2	73.6	84.4	71.2	82.1	70.3	118.8	79.8	67.7	108.6	77.5	27.5	24.7	21.4	8763	450
Ohio																										
AKRON AKRON-CANTON REG AP	40.92N	81.44W	1237	1.8	7.1	88.7	72.9	85.9	71.7	83.3	70.2	75.4	84.6	73.9	82.3	72.7	126.9	80.3	71.3	120.8	78.3	23.4	19.8	18.1	6044	676
CINCINNATI MUNICIPAL AP LUNKI	39.10N	84.42W	499	6.3	12.4	92.8	74.9	90.2	74.4	87.9	73.2	77.9	88.0	76.7	86.2	75.1	134.1	82.5	73.8	128.2	81.1	20.2	18.3	16.6	4754	1151
CLEVELAND HOPKINS INTL AP	41.41N	81.85W	804	2.3	8.5	89.4	73.9	86.7	72.5	84.1	71.1	76.3	85.6	74.7	83.1	73.3	127.4	81.4	71.9	121.6	79.6	24.7	21.0	19.0	5904	743
COLUMBUS PORT COLUMBUS INTL A	39.99N	82.88W	817	3.2	9.1	91.1	73.8	88.7	72.8	86.3	71.6	76.7	86.8	75.2	84.5	73.6	129.0	81.2	72.3	123.4	80.2	21.9	18.9	16.9	5322	971
DAYTON INTERNATIONAL AIRPORT	39.91N	84.22W	1004	0.6	6.9	90.3	73.6	87.9	72.8	85.4	71.3	76.5	86.2	75.1	84.0	73.4	128.8	81.8	72.2	123.6	80.4	24.4	20.7	18.7	5549	924
FINDLAY AIRPORT	41.01N	83.67W	814	-0.4	5.6	90.4	73.5	87.8	72.6	84.8	70.8	76.8	86.2	75.0	83.3	73.7	129.5	82.1	72.3	123.1	80.1	24.4	20.7	18.8	5994	777
LANCASTERFAIRFIEL	39.75N	82.65W	866	3.1	9.9	90.5	74.0	88.3	73.5	85.6	71.9	76.8	86.6	75.4	84.0	73.3	127.8	80.9	72.5	124.6	80.1	20.2	17.9	16.1	5474	776
MANSTERFIELD LAHM MUNICIPAL ARPT	40.82N	82.52W	1312	0.1	5.7	88.0	73.0	85.5	71.7	83.1	70.4	75.8	84.6	74.3	82.5	73.1	129.0	80.8	71.7	122.8	79.3	24.6	21.1	19.1	6150	659
OHIO STATE UNIVERSITY	40.07N	83.07W	928	6.9	11.7	90.4	73.7	88.2	73.1	85.3	71.9	76.4	86.1	75.1	83.8	78.0	126.9	81.1	72.3	123.9	80.1	21.6	19.0	17.2	5343	899
RICKENBACKER ANGB	39.82N	82.93W	755	4.3	10.3	92.5	75.7	90.1	74.9	87.7	73.9	79.8	86.7	77.7	86.1	75.5	132.4	84.2	75.1	135.6	81.3	22.1	18.9	16.8	5172	1028
TOLEDO EXPRESS AIRPORT	41.59N	83.80W	692	-0.3	5.3	91.2	74.2	88.4	72.7	85.7	71.4	77.2	86.9	75.4	84.2	74.2	131.0	82.9	72.7	124.2	80.7	24.3	20.6	18.6	6156	773
WRIGHT-PATERSON AFB	39.83N	84.05W	820	1.4	8.5	91.3	74.5	89.2	73.6	86.4	72.2	77.5	87.1	75.9	85.0	74.8	134.3	82.5	73.0	126.4	80.8	21.5	18.8	16.8	5381	974
YOUNGSTOWN REGIONAL AIRPORT	41.25N	80.67W	1188	1.8	7.1	88.5	72.7	85.8	71.1	83.4	69.7	75.1	84.7	73.5	82.1	72.1	124.3	79.6	70.7	118.1	77.7	21.9	19.0	17.4	6218	577
Oklahoma																										
FORT SILL	34.65N	98.40W	1211	12.6	18.9	100.5	72.8	98.2	73.0	95.5	73.2	77.4	90.6	76.4	89.6	74.1	133.1	82.6	72.8	127.3	81.3	24.8	21.2	19.2	3268	2111
LAWTON MUNICIPAL	34.57N	98.42W	1109	17.9	20.8	102.4	73.4	100.2	73.7	98.9	73.8	78.1	92.9	77.2	91.6	73.4	129.4	83.9	72.9	127.2	83.7	26.0	23.1	20.1	3163	2248
OKLAHOMA CITY WILL ROGERS WOR	35.39N	97.60W	1306	11.4	17.4	99.5	74.1	96.8	74.1	94.0	73.8	77.7	90.8	76.7	89.9	74.1	133.6	83.7	73.0	128.7	82.4	27.2	24.7	22.2	3516	1926
OKLAHOMA CITY/WILEY	35.53N	97.65W	1299	12.1	17.9	99.5	73.8	97.2	73.9	94.2	73.7	77.4	91.1	76.4	89.9	73.4	130.2	83.4	72.6	126.7	82.5	26.4	24.1	21.3	3493	2045
STILLWATER RGNL	36.15N	97.08W	1010	13.6	18.2	101.8	75.0	99.2	75.3	96.6	75.2	79.0	93.4	77.9	92.2	75.1	136.8	85.7	73.4	128.8	83.8	24.6	21.5	19.5	3571	1982
TINKER AFB	35.42N	97.38W	1260	12.1	17.9	99.3	73.6	96.7	74.0	93.6	73.9	78.2	90.8	77.1	89.8	74.1	131.8	84.8	73.3	129.8	82.9	25.5	22.7	20.0	3407	1971
TULSA INTERNATIONAL AIRPORT	36.20N	95.89W	676	10.9	16.8	99.4	75.8	96.8	76.0	94.2	75.6	79.2	92.3	78.1	91.2	75.5	136.9	84.5	74.4	131.9	84.5	24.5	21.0	19.2	3494	2060
TULSA/LLOYD JONES	36.03N	95.98W	633	15.8	18.8	100.1	76.3	98.8	76.8	95.4	76.7	79.6	94.3	78.5	92.7	75.4	136.1	85.5	74.8	133.5	85.1	19.8	17.8	16.1	3481	2004
VANCE AFB	36.33N	97.92W	1339	6.5	13.1	100.6	73.5	98.6	73.5	95.5	73.7	77.4	91.8	76.4	90.9	73.4	130.7	83.2	72.4	126.2	82.6	26.7	23.9	20.7	3996	1903
Oregon																										
AURORA STATE	45.25N	122.77W	197	27.5	29.7	91.2	67.2	88.2	67.1	83.9	65.8	70.2	85.6	68.4	83.8	64.0	90.0	76.5	67.4	87.2	74.1	18.2	15.9	12.9	4333	385
CORVALLIS MUNI	44.48N	123.28W	253	25.0	27.7	92.9	66.7	89.8	65.7	85.7	64.1	68.4	89.5	66.8	86.9	60.6	79.9	77.8	67.4	71.0	74.6	19.7	17.7	15.9	4204	412
EUGENE MAHLON SWEET ARPT	44.13N	123.21W	374	22.4	26.3	91.4	66.6	87.6	65.5	83.9	64.4	68.7	87.2	67.0	84.5	62.0	84.3	74.5	60.2	79.0	72.1	19.6	17.5	15.9	4676	259
MC MINNVILLE MUNI	45.18N	123.13W	167	27.6	29.8	91.4	65.8	89.5	66.1	84.1	64.6	68.5	87.4	66.9	85.5	61.5	82.0	72.2	60.7	79.7	71.7	20.9	18.0	15.8	4559	300
MEDFORD ROGUE VALLEY INTL AP	42.39N	122.87W	1329	22.9	25.7	98.9	67.2	95.3	65.9	91.9	64.7	69.0	94.0	67.5	91.4	60.4	82.4	74.5	58.6	77.1	73.9	18.4	15.5	12.5	4323	790
PORTLAND INTERNATIONAL AP	45.59N	122.60W	108	23.9	28.6	91.2	67.5	87.1	66.5	83.4	65.3	69.4	87.0	67.8	84.5	62.9	86.1	75.2	61.4	81.6	73.1	23.8	19.8	17.6	4222	423
PORTLAND/HILLSBORO	45.53N	122.95W	203	21.8	26.6	91.8	68.1	88.1	67.1	83.9	65.6	70.5	87.9	68.3	85.1	63.8	89.2	77.3	61.8	83.0	74.1	18.9	17.1	14.6	4750	280
REDMOND ROBERTS FIELD	44.25N	121.15W	3084	5.4	11.9	92.8	61.9	89.9	61.0	86.5	59.7	63.8	88.4	62.2	85.9	54.8	71.7	67.4	53.0	66.9	67.0	20.6	18.5	16.7	6540	229
SALEM MCNARY FIELD	44.91N	123.00W	200	21.9	26.2	92.0	67.0	87.9	65.8	84.1	64.6	68.7	88.2	67.1	85.0	61.4	82.0	73.9	59.8	77.4	72.6	20.8	18.3	16.3	4576	292
Pennsylvania																										
ALLENTOWN LEHIGH VALLEY INTL	40.65N	75.45W	384	7.0	11.5	91.0	73.8	88.2	72.5	85.6	71.3	76.7	86.3	75.2	83.8	73.8	127.8	81.1	72.5	122.0	79.7	24.2	20.3	18.1	5564	828
ALTOONA BLAIR CO ARPT	40.38N	78.32W	1470	4.7	9.6	88.5	72.0	85.7	70.7	83.0	69.6	74.7	83.9	73.2	82.0	72.0	125.0	79.6	70.3	118.0	77.7	21.9	18.8	17.2	5959	617
BUTLER CO. (AWOS)	40.78N	79.95W	1247	3.1	8.9	88.0	72.4	84.4	70.6	82.1	69.1	74.6	83.5	72.4	80.8	72.1	124.6	79.8	70.4	117.1	77.3	17.8	15.3	12.9	6098	535
ERIE INTERNATIONAL AP	42.08N	80.18W	738	5.2	9.7	86.4	72.9	84.0	71.6	81.7	70.7	75.3	82.6	73.8	81.0	72.8	125.									

Apéndice 5. Esquema de las instalaciones Salem II

