



Optimización del Sistema de Agua Fría para Equipos de Soporte en Manufactura Farmacéutica

Edgardo J. Maldonado Vila
Prof. Héctor J. Cruzado
Gerencia de Ingeniería



Resumen

Este proyecto resolvió deficiencias críticas del sistema de agua fría en una planta farmacéutica que comprometían el cumplimiento regulatorio y la continuidad operacional. El diagnóstico identificó equipos al 100% de capacidad con 70% de vida útil consumida y deficiencia de 25% en capacidad requerida (1,200 toneladas). Se evaluaron tres alternativas, seleccionando una solución híbrida que integra reemplazo del sistema de bombeo con variadores de frecuencia y adición de unidad enfriadora Trane de 1,200 toneladas con redundancia N+1. Los beneficios incluyeron reducción de costos energéticos de \$375,000 anuales, disminución de mantenimiento de \$200,000 anuales y recuperación de inversión en 1.5 años (\$750,000). La solución garantiza cumplimiento GMP, minimiza riesgos operacionales y proporciona capacidad para crecimiento futuro.

Introducción

La industria farmacéutica opera bajo estrictos estándares regulatorios como las Buenas Prácticas de Manufactura (GMP) que exigen control preciso de condiciones ambientales. Los sistemas de HVAC son críticos para este cumplimiento, ya que cualquier desviación puede comprometer la integridad del producto y la seguridad del paciente. Una planta farmacéutica de mediano tamaño enfrenta deficiencias críticas en su sistema de agua fría que suministra refrigeración a las unidades manejadoras de aire. Las unidades actuales operan al 100% de capacidad durante alta demanda térmica, generando tres problemas principales: falta de redundancia operacional, capacidad insuficiente (deficiencia del 25%), y limitaciones para expansión futura. El objetivo fue diseñar un sistema confiable y expandible de agua fría que asegure cumplimiento normativo, continuidad operacional y capacidad de crecimiento.

Metodología

El proyecto se ejecutó en tres fases secuenciales con participación de un equipo multidisciplinario:

Fase 1: Diagnóstico del Sistema Existente

Se realizaron entrevistas con personal clave, inspecciones visuales en campo y análisis de datos históricos de operación. Se evaluaron bombas de agua, unidades enfriadoras, manejadoras de aire e instrumentación para determinar estado actual, vida útil remanente y capacidad operacional. Se incorporaron reportes técnicos de la aseguradora para identificar riesgos y requerimientos de cumplimiento.

Fase 2: Desarrollo y Evaluación de Alternativas

Se generaron tres alternativas técnicas evaluadas mediante criterios cuantitativos: inversión, plazo de implementación, eficiencia energética, redundancia operacional, capacidad de crecimiento y riesgo operacional. Se desarrolló una matriz comparativa para seleccionar la solución óptima basada en beneficios a corto y largo plazo.

Fase 3: Diseño Detallado

Se desarrolló el diseño de ingeniería detallado integrando disciplinas mecánica, eléctrica, estructural y de controles. El diseño incluyó especificaciones de equipos, planos de instalación, análisis de integración con sistemas existentes y proyecciones de desempeño y retorno de inversión.

Resultados

El diagnóstico reveló deficiencias críticas en capacidad y vida útil. Las bombas operan al 100% de capacidad sin margen operacional, alcanzando el 70% de su vida útil estimada. Durante alta demanda, se requiere operación en paralelo de dos bombas para aproximarse a los requerimientos. El análisis de carga térmica determinó necesidad de 1,200 toneladas de refrigeración, representando un incremento del 25% respecto a la capacidad instalada. Se identificó potencial de reducción energética del 10-20% mediante equipos nuevos operando a carga parcial más eficiente.

Evaluación de Alternativas

Se evaluaron tres alternativas mediante criterios técnico-económicos (Tabla 1). La Alternativa 1 (balanceo con equipos existentes) ofrece inversión mínima, pero resolución parcial sin garantía. La Alternativa 2 (reemplazo completo) requiere inversión de \$900,000 con parada programada. La Alternativa 3 (adición con redundancia) presenta inversión de \$750,000 con mayor capacidad de crecimiento y redundancia operacional. Se seleccionó una solución híbrida integrando elementos de Alternativas 2 y 3 para optimizar beneficios técnicos y operacionales.

Solución Implementada

La solución integra tres componentes principales:

Sistema de Bombeo: Reemplazo completo por equipos con variadores de frecuencia (VFD), eliminando operación al límite de capacidad. Reducción proyectada de costos energéticos de \$375,000 anuales y mantenimiento de \$200,000 anuales. Los VFD permiten ajuste de velocidad según demanda instantánea, optimizando consumo y reduciendo estrés mecánico.

Sistema de Generación: Unidad enfriadora Trane de 1,200 toneladas como equipo principal, manteniendo unidades existentes como respaldo en configuración N+1. Esta arquitectura garantiza continuidad durante mantenimientos o fallas, cumpliendo requisitos GMP. El variador de frecuencia permite operación a carga parcial con mayor eficiencia.

Infraestructura: Edificio de dos niveles con 1,800 pies cuadrados para equipos mecánicos y 2,000 pies cuadrados para oficinas administrativas, respondiendo simultáneamente a necesidades de espacio técnico y expansión de personal.

Beneficios Cuantificados:

- Capacidad: 1,200 toneladas (incremento 25%)
- Redundancia: N+1
- Ahorro energético: \$375,000/año
- Ahorro mantenimiento: \$200,000/año
- ROI: 1.5 años sobre inversión de \$750,000

Table 1
Comparativa de Alternativas Propuestas

Criterio	Alternativa 1: Balanceo con Equipos Existentes	Alternativa 2: Reemplazo de Bombas y Unidad Enfriadora	Alternativa 3: Adición de Equipos con Redundancia
Inversión estimada	Mínima	\$900,000.00	\$750,000.00
Plazo de implementación	1-2 días	1 mes	2-3 meses
Interrupción operacional	Mínima	Parada programada requerida	Menor tiempo de parada
Resolución del problema	Parcial - no garantizada	Definitiva	Definitiva
Eficiencia energética	Sin mejora	Reducción de consumo	Mejora moderada
Redundancia operacional	No	No	Sí
Capacidad de crecimiento	Limitada	Moderada	Alta - capacidad expandida
Vida útil	No se extiende	Equipos nuevos con garantía	Equipos nuevos + existentes
Requerimiento de espacio	No aplica	Mismo espacio	Requiere espacio adicional
Riesgo operacional	Alto - equipos antiguos continúan	Bajo - equipos nuevos	Moderado - equipos mixtos

Conclusión

El proyecto desarrolló una solución integral que resuelve las deficiencias críticas del sistema de agua fría de la planta farmacéutica, asegurando cumplimiento regulatorio y capacidad para crecimiento futuro.

Hallazgos Principales:

- El sistema existente opera al 100% de capacidad con deficiencia del 25% respecto a demanda requerida (1,200 toneladas)
- Equipos han consumido 70% de vida útil sin redundancia operacional para mantenimientos
- Solución híbrida seleccionada integra reemplazo de bombeo con VFD y unidad enfriadora Trane de 1,200 toneladas en configuración N+1

Beneficios Demostrados:

- Reducción de costos energéticos: \$375,000 anuales
- Reducción de costos de mantenimiento: \$200,000 anuales
- Período de recuperación: 1.5 años sobre inversión de \$750,000
- Incremento de capacidad del 25% con redundancia operacional

Contribuciones del Trabajo:

Esta solución establece la infraestructura necesaria para mantener condiciones ambientales críticas de manera consistente, apoyar el cumplimiento con Buenas Prácticas de Manufactura (GMP), reducir riesgos de interrupciones operacionales y proporcionar capacidad para implementar planes de expansión futura y desarrollo de nuevos productos. El diseño del edificio de dos niveles optimiza el uso del terreno disponible, albergando equipos mecánicos y 2,000 pies cuadrados de oficinas para el crecimiento proyectado del personal técnico.

Referencias

- American Society for Health Care Engineering. (2023). *Optimizing chilled water plant performance*. American Hospital
- Zhu, J., “et al” (2025) Direct load control strategy of centralized chiller plants for emergency demand response: A field experiment. *Buildings* 15(3), 462.