



Revista Hambatu Science

Ambato – Ecuador / ISSN 3151-815X (en línea) / abril – junio 2026

Volumen 1, Número 2

<https://doi.org/10.63862/rhs-181-210-2026>

Influencia de los modos de control en la eficiencia energética de un chiller industrial de 360 kW

*Influence of control modes on the energy efficiency of a 360
kW industrial chiller*

Diego Vladimir Quispe Mamani
Universidad Mayor de San Andrés



DOI: <https://doi.org/10.63862/rhs-v1n2-181-210-2026>

Influencia de los modos de control en la eficiencia energética de un chiller industrial de 360 kW

Diego Vladimir Quispe Mamani

Universidad Mayor de San Andrés

dvquispe22@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-8252-8333>

La Paz, Bolivia

Recibido: 2026-05-15

Aceptado: 2026-05-22

Publicado: 2026-06-01



Resumen

La presente investigación aborda un tema no muy desarrollado en el ámbito industrial, pero que abarca una necesidad tanto a nivel económico como técnico, la eficiencia energética en instalaciones industriales donde se tiene equipos de gran potencia como los chillers. En esta investigación se evalúa el consumo energético de un enfriador de agua (chiller) de dos unidades de refrigeración, bajo tres factores, el modo de control, la banda de temperatura y el punto de consigna. Este análisis se lo realiza desde una perspectiva amplia que involucra la estimación del COP, el cual brinda un panorama más amplio del uso de energía en el equipo. Se usó un diseño experimental factorial mixto y se incluyó a la temperatura ambiente como factor de bloque, con un total 24 corridas experimentales desarrolladas bajo las mismas condiciones de carga térmica, tipo de producto, etapa de proceso y capacidad de operación. Se observó que los modos de control tienen un efecto diferente sobre el elemento final de control, los compresores, y que independientemente de su combinación con los otros factores, cada modo de control tiene un patrón de control establecido. Se observó diferencias significativas en los tiempos de arranque y paro de los compresores. Se logró determinar que los modos de control tienen efecto sobre la respuesta, pero el mayor efecto lo tiene la interacción del modo de control con los otros dos factores. Un máximo COP dependerá de la combinación de los niveles de estos factores, observándose un mejor desempeño en el modo de control integral, que refleja un mayor COP. Se plantea una combinación que optimiza el valor de la respuesta. Se verifica el modelo estadístico con el cumplimiento de los supuestos.

Palabras clave: Chiller, COP, eficiencia energética, modo de control, potencia frigorífica.

Influence of control modes on the energy efficiency of a 360 kW industrial chiller

Abstract

This research addresses a topic that is not widely explored in the industrial sector, but which encompasses a need at both the economic and technical levels: energy efficiency in industrial facilities with high-power equipment such as chillers. This study evaluates the energy consumption of a two-unit water chiller under three factors: control mode, temperature range, and setpoint. This analysis is conducted from a broad perspective that includes estimating the COP (Coefficient of Performance), which provides a more comprehensive view of the equipment's energy use. A mixed factorial experimental design was used, with ambient temperature included as a blocking factor. A total of 24 experimental runs were performed under the same conditions of thermal load, product type, process stage, and operating capacity. It was observed that the control modes have different effects on the final control element, the compressors, and that regardless of their combination with the other factors, each control mode has a defined control pattern. Significant differences were observed in the compressor start-up and stop times. It was determined that the modes affect the response, but the greatest effect comes from the interaction of the control mode with the other two factors. The maximum COP will depend on the combination of these factors, with the integral control mode showing the best performance and the highest COP. A combination that optimizes the response value is proposed. The statistical model is verified against the assumptions.

Keywords: Energy efficiency, COP, Chiller, control mode, refrigeration power.

Introducción

La introducción debe presentar el contexto general del tema de investigación y justificar la importancia del estudio. En este apartado se debe describir el problema de investigación, los antecedentes más relevantes, el propósito del estudio y los objetivos que se persiguen. La introducción debe orientar al lector sobre el alcance del trabajo y su contribución al conocimiento científico, evitando incluir resultados o conclusiones.

Dentro de instalaciones industriales uno de los sistemas que requiere gran cantidad de energía para su operación son los sistemas HVAC¹, es decir los sistemas de climatización de ambientes de uso comercial y/o industrial. Dentro de estos sistemas se encuentran los Chillers que muchas veces son usados en combinación con una red de unidades ventilconvectoras para lograr la climatización de un ambiente. Esta climatización debe ser constante, es común ver que estos equipos funcionan por más de 12 horas continuas en ambientes comerciales y durante las 24 horas en ambiente industriales.

Yamamoto, Hayama, y Hayashi (2020) indican que en un análisis del consumo energético en los Estados Unidos ha demostrado que la energía requerida por los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) representa el 50% del consumo energético de una instalación. El corazón de estos sistemas HVAC son generalmente los Chillers, equipos de gran potencia. Se calcula que el consumo energético de este equipo ronda entre el 30% y 60%, lo que impacta directamente sobre el costo operativo y la competitividad de las empresas y más aún cuando el proceso es intensivo en tiempo y energía, como la liofilización.

El proceso de liofilización se caracteriza por requerir de temperaturas de congelación de -50°C e incluso llegar a temperaturas de -60°C, con tiempos de proceso que superan las 30 horas; por esta razón, el proceso de liofilización es un proceso intensivo a nivel energético, lo que influye directamente en los costos operativos y la competitividad.

La forma en la que los chillers responden al proceso dependen de factores como las cargas térmicas constantes o variables, temperatura ambiente, temperatura del agua fría, tiempos de operación, entre otras. El sistema de control propio del equipo opera bajo un modo de control,

¹ HVAC es el acrónimo de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (del inglés Heating, Ventilation, and Air Conditioning).

es decir que estos equipos tienen programados ciertos modos de control o tipos de control, para satisfacer la demanda térmica.

El equipo trabaja bajo un modo de control estandarizado y predeterminado que es inflexible a las particularidades del proceso de liofilización, en otras palabras, los parámetros operativos que propone el fabricante, no siempre son las más adecuadas para los equipos, porque el contexto operativo y las necesidades productivas cambian de un contexto a otro y depende fuertemente de las particularidades de cada proceso. Por esta razón es necesario que el equipo sea flexible a las condiciones de trabajo. Evaluar cómo se comporta cada modo de control bajo las condiciones reales de operación permite entender con precisión qué estrategia es la más eficiente y qué ajustes pueden mejorar el rendimiento del chiller.

El chiller industrial es uno de los equipos de mayor consumo energético dentro de la planta y, al mismo tiempo, uno de los más críticos dentro del proceso. Durante la gestión 2025, la planta gastó aproximadamente 915.000 bolivianos en energía eléctrica, estimándose que cerca del 50% de dicho consumo se debe al chiller.

Adicionalmente, se ha observado que el modo control predeterminado del chiller provoca en los compresores ciclos de arranque-paro de aproximadamente cinco minutos, con ventanas entre ciclos de 5 a 10 minutos. Mediciones realizadas evidencian un desbalance de corriente en el compresor, generando una corriente en la línea de masa de alrededor de 25 amperios. Los ciclos cortos de arranque-paro someten al compresor a estrés térmico y eléctrico reiterado, lo que puede deteriorar el aislamiento de los bobinados y manifestarse en forma de desbalances de corriente. Los ciclos de arranque-paro de 5 minutos, junto con el desbalance de corriente de 25 A en la línea de masa, reducen la vida útil esperada del compresor, incrementando la frecuencia y el costo de las intervenciones de mantenimiento. Además de ser un activo crítico y de alta inversión, esta situación representa un riesgo operativo adicional al impacto energético.

Esta situación hace necesario la evaluación de todos los modos de control que tiene el equipo (proporcional, integral y proporcional-integral) y su impacto en la eficiencia energética, para determinar si existe algún cambio en la eficiencia energética del equipo.

Un modo de control óptimo permitirá reducir los tiempos de arranque-paro y reducir el consumo energético del equipo. El primer aspecto es importante, porque influye directamente en la vida

útil del activo y más aún al tratarse de un equipo de gran potencia, crítico a nivel productivo y de un alto costo de mantenimiento. Por otro lado, la reducción del consumo energético que se puede lograr con la optimización del modo de control, es significativa, por la alta potencia que tiene el equipo.

Los resultados de la investigación permitirán seleccionar el modo de control (proporcional, integral o proporcional-integral) que minimice el consumo energético del chiller en condiciones de carga parcial (25% de su capacidad nominal) y para procesos intensivos como la liofilización. Una reducción del consumo energético impacta directamente en los costos operativos de la planta, que actualmente superan los 915.000 bolivianos anuales en electricidad. Asimismo, la identificación del modo de control que reduce los ciclos de arranque-paro contribuirá a disminuir el estrés térmico y eléctrico del compresor, extendiendo su vida útil y reduciendo los costos de mantenimiento de un activo crítico y de alta inversión.

El estudio también aportará evidencia empírica sobre el comportamiento de los modos de control proporcional, integral y proporcional-integral en un chiller de 360 kW operando al 25% de su capacidad, del cual no existe literatura documentada para procesos de liofilización. Los hallazgos permitirán contrastar si las recomendaciones genéricas de los fabricantes son aplicables a contextos operativos extremos o si estas requieren una reconfiguración específica del controlador para optimizar la eficiencia energética y la confiabilidad operativa.

El objetivo de la investigación es evaluar la influencia de los modos de control en la eficiencia energética de un Chiller industrial de 360 kW dentro de una planta liofilizadora. Entiéndase como eficiencia energética desde un sentido amplio del consumo energético por parte del equipo, usando como indicado el COP (*coefficient of performance*), característico de sistemas de refrigeración de los chillers. La hipótesis de investigación es la siguiente:

H_0 : No existe influencia de los modos de control proporcional, integral y proporcional integral en el COP del Chiller.

H_1 : Existe influencia de al menos un modo de control: proporcional, integral o proporcional integral, sobre el COP del Chiller.

“El COP es la relación entre la capacidad de refrigeración y la potencia absorbida por el compresor” (Burba, 2013). Para Gonzales (2012), el coeficiente de rendimiento de un ciclo de

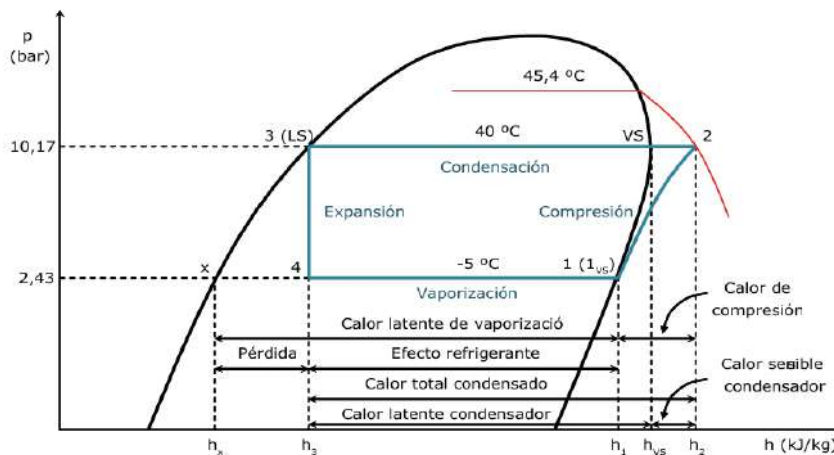
refrigeración es una expresión de la eficiencia del ciclo, que queda definido como la relación entre el calor absorbido en el espacio refrigerado y la energía térmica equivalente de la energía suministrada al compresor.

Tomando en cuenta el diagrama termodinámico P-h (figura 1), el COP mide la relación entre el cambio de entalpía del evaporador q_e y el cambio de entalpía durante la compresión w_i , es decir:

$$COP = \frac{\text{Calor extraído}}{\text{trabajo de compresion}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{q_e}{w_i}$$

$$COP = \frac{q_e}{w_i} \quad (1)$$

Figura 1. Diagrama presión – entalpía



Fuente: (Gonzales, 2012)

La ecuación 1 muestra que la suma de la energía captada al nivel del evaporador y de la energía utilizada por el compresor, debe ser evacuada por el condensador fuera del sistema. La máquina de frío tendrá una eficiencia buena en la medida que requiere poca energía eléctrica al nivel del compresor para alcanzar una potencia frigorífica al evaporador.

El fabricante proporciona el valor estimado del COP de acuerdo a determinadas condiciones operativas. En la práctica también es posible determinar este valor con mediciones que se pueden realizar en campo. Este valor puede oscilar o cambiar dependiendo de las condiciones

operativas del equipo. En un Chiller ya sea enfriado con agua o aire se usan las mismas ecuaciones para determinar la eficiencia. En primer lugar, se debe determinar la ecuación de la capacidad frigorífica del equipo:

$$\dot{Q}_f = \dot{m}C_p\Delta T \quad (2)$$

En unidades del SI se tiene:

\dot{Q}_f : Capacidad o potencia frigorífica (W)

\dot{m} : Flujo masico por unidad de tiempo (Kg/s)

C_p : Capacidad calorífica del agua (J/Kg°C)

ΔT : variación de temperatura (°C)

Ahora, para calcular el COP a partir de la energía tanto eléctrica como frigorífica, se debe considera un intervalo de tiempo, de manera que el mismo intervalo de tiempo sea aplicado a cada medida, es decir:

$$COP = \frac{\dot{Q}_f}{P} = \frac{\dot{Q}_f \times \Delta t}{P \times \Delta t} \quad (3)$$

Dónde:

\dot{Q}_f : Capacidad o potencia frigorífica (W)

P : Potencia eléctrica del compresor y auxiliares (W)

Δt : Intervalo de tiempo de la medida. (s)

Se debe notar que el producto de $P \times \Delta t$, es la energía eléctrica absorbida por el equipo en un determinado intervalo de tiempo y como se trata de un sistema trifásico la potencia eléctrica total absorbida por equipo es:

$$P = P_a + P_b + P_c^2 \quad (4)$$

Los subíndices a, b y c representan las fases del sistema trifásico.

² Esta ecuación es aplicada cuando se tiene sistemas trifásicos desbalanceados, donde debido a la diferencia de impedancias del equipo o de la línea de alimentación, se tiene corrientes distintas en cada fase.

Estado del arte

Como se mencionó, el consumo energético de un Chiller depende de varios factores. Wan et al. (2024) documenta que los chillers operan con COP alto solo en ciertos radios de carga parcial favorables, y bajo en otros y esto se sustenta en un estudio realizado por Seo y Lee (2016) donde se analiza el consumo energético de refrigeración de un edificio de oficinas, y se encontró que cuando el funcionamiento de la unidad de refrigeración no estaba bien planificado, el 70 % de su consumo energético anual se situaba dentro del rango de baja carga de producción (0 %-50 %), lo que resultaba en coeficientes de rendimiento (COP) muy bajos durante su funcionamiento. La investigación propone estrategias de regulación de carga con ahorros del 5.7% al 10.8%. Esta situación se refleja dentro de la planta de liofilización donde más de 90% del tiempo del proceso, el compresor del chiller se encuentra al 25% de radio de carga, lo que conlleva a una revisión y optimización de modo de control.

También se evidencia la existencia de investigaciones que buscan la reducción del consumo energético como la investigación de Chen et al. (2026) que indica que los chillers suelen ser el mayor consumidor de energía de toda una instalación, y su consumo representa hasta la mitad del presupuesto energético total y, que estrategias avanzadas en la optimización del control de secuenciación del chillers y la carga óptima de chillers, pueden generar importantes ahorros de energía, que a menudo oscilan entre el 5 % y más del 30 %. El estudio de Sh F Alajmi (2020) indica que los chiller son equipos que representan un consumo eléctrico del 60 % en plantas industriales y centros comerciales. Por esta razón se considera importante una mejora de la eficiencia energética, lo que se traduce en una reducción de 30% en costos energéticos usando equipos más eficientes. Ambos estudios sustentan el costo energético del 50% por parte del chiller dentro de la planta liofilizadora, además, se indica que aplicar estrategias en el control pueden lograr reducir el consumo energético.

El estudio de Lin, Shan y Wang (2025) demuestra que una estrategia de control optimizada puede reducir el consumo en un 28% en condiciones de baja carga. Estas estrategias emplean un enfoque basado en modelos que utiliza aprendizaje profundo para mejorar la eficiencia energética del sistema de refrigeración, manteniendo al mismo tiempo una frecuencia de arranque y parada aceptable. Esta investigación aborda el mismo problema que se tiene en planta, cuyos resultados redujeron significativamente el consumo energético. Otro estudio muy

similar en cuanto a problemática es el de Xin et al. (2024) que proponen estrategias de control predictivo (MPC) aprovechando el almacenamiento frío inherente en la red de agua enfriada. En pruebas de campo, lograron reducción de consumo de potencia del chiller del 28,1 % durante la noche y 14 % al final del horario laboral. Además, indica que el control avanzado de sistemas HVAC pueden reducir el consumo energético en promedio entre 13% -28%. Borkowski Krzysztof (2022), validan experimentalmente una estrategia que le permitió aumentar en 2064 horas el tiempo en modo free-cooling, incrementar el COP en un 69% y reducir el consumo eléctrico en 206.9 MWh gracias a la utilización del modo free-cooling. Esta estrategia permite el cambio correcto entre modos de operación y un control individual de cada componente del sistema de enfriamiento.

Otros estudios como el de Yu et al. (2014) menciona que el consumo energético en un chiller se incrementa a medida que la vida operativa del equipo avanza y menciona dos métodos de cálculo de la eficiencia energética: el coeficiente de índice de desempeño (COP) y IPLV (valor integrado de una carga parcial). Rey et al. (2020) evalúa una estrategia de eficiencia energética aplicada a un chiller enfriado por aire de 8.6 MW, cuyo desempeño nominal está limitado por el uso de compresores de tornillo con un EER de 2.98 a plena carga. Para mejorar su rendimiento, el sistema fue modificado agregando paneles de enfriamiento evaporativo antes del condensador, con el fin de reducir la temperatura del aire de entrada y mejorar las condiciones de condensación. Los resultados indican un aumento significativo del ESEER, pasando de 3.69 a 4.83, junto con una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

La revisión de la literatura muestra un consenso: los chillers operando a baja carga parcial (como el 25% del presente estudio) presentan COP reducidos y alto consumo energético (Seo y Lee, 2016; Wan et al., 2024). Diversas estrategias de control avanzado han demostrado ahorros significativos: Lin et al. (2025) lograron 28% con aprendizaje profundo, Xin et al. (2024) alcanzaron 28.1% con MPC, y Borkowski (2022) incrementó el COP en 69% optimizando modos de operación. Sin embargo, estas soluciones son complejas, costosas y requieren recursos tecnológicos no siempre disponibles en plantas industriales convencionales.

No se ha evidenciado información específica previa que haya evaluado el efecto aislado de los modos de control (Proporcional, Integral, Proporcional-Integral) sobre la eficiencia energética de un chiller industrial a baja carga, ni ha relacionado estos modos de control con los ciclos de

arranque-paro y el desbalance de corriente en el compresor. El presente estudio aborda este vacío, ofreciendo una solución de bajo costo y alta aplicabilidad frente a estrategias avanzadas que resultan inviables en muchos contextos industriales.

Metodología

La metodología debe describir de manera clara y detallada cómo se desarrolló la investigación, permitiendo que el estudio pueda ser replicado. Se debe especificar el enfoque metodológico, el tipo de estudio, la población y muestra (si aplica), los métodos y técnicas de recolección de datos, así como los procedimientos de análisis utilizados.

El enfoque de la presente investigación es el enfoque cuantitativo, porque es el camino que permitirá alcanzar los objetivos planteados y por las características de la información analizada, es necesario de herramientas matemáticas como la estadística para la síntesis de la información. “La ruta cuantitativa es apropiada cuando queremos estimar las magnitudes u ocurrencia de los fenómenos y probar hipótesis” (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018). Para el caso de la investigación es necesario medir y estimar magnitudes mediante instrumentos de medidas de variables física y ecuaciones matemáticas que estimen las variables de la investigación.

Se toma el estudio como exploratorio, el cual se lleva a cabo cuando el propósito es examinar un fenómeno o problema de investigación nuevo o poco estudiado, sobre el cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes. Es decir, cuando la revisión de la literatura reveló que tan solo hay guías no investigadas e ideas vagamente relacionadas con el problema de estudio, o bien, si deseamos indagar sobre temas y áreas desde nuevas perspectivas. (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018).

Para la recolección de la información se acude al diseño experimental, donde por naturaleza de la investigación se manipulan las variables independientes de manera intencionada para observar el efecto que tiene sobre la variable dependiente. Esta última es una variable medible. Las variables independientes tienen niveles (valores de actuación), que son definidas por el investigador. “Es decir, los diseños experimentales se utilizan cuando el investigador pretende establecer el posible efecto de una causa que se manipula” (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018).

Aunque el fenómeno ha sido poco estudiado, se opta por un diseño experimental robusto para obtener evidencia concluyente que permita establecer relaciones causales entre los modos de control y la eficiencia energética. Este tipo de diseño investigativo se adecua perfectamente a la naturaleza de la investigación porque se busca determinar el efecto del modo de control, el punto de consigna y la banda de temperatura sobre otra variable dependiente, que es el índice COP (tabla 1).

Tabla 1 Variables independientes y dependientes

Variables independientes		Variables dependientes	
Variables	Nivel	Variables	Nivel
Modo de control	Proporcional (PROP)	Energía eléctrica	1
	Integral (INT)	Energía frigorífica	1
	Proporcional-Integral (PI)	Índice COP	1
Punto de consigna	7.0 °C		
	7.5 °C		
Banda de temperatura	5.0 °C		
	8.0 °C		

Fuente: Elaboración propia

El punto de consigna y la banda de temperatura se manipulan independientemente del modo de control aplicado, es decir que se tiene combinaciones de estas variables (véase diseño factorial). Se entiende como punto de consigna como la temperatura deseada de agua fría. La banda de temperatura tiene funciones distintas que dependen directamente de modo de control elegido. Para un control proporcional la banda de temperatura define la sensibilidad del controlador, donde la potencia varía linealmente con el error. Para un control integral la banda de temperatura define el umbral de activación, fuera de la banda se acumula error y se aumenta potencia continuamente. Para un control proporcional-integral, define la sensibilidad inicial y el integrador corrige el error permanentemente.

Para la recolección de datos se toma como técnica la medición instrumental. Kothari (2004) menciona que las mediciones instrumentales representan una técnica clave de recopilación de datos en la investigación científica y de ingeniería, ya que proporcionan datos cuantitativos precisos y fiables. Se toma como técnica de investigación la medición instrumental porque, las mediciones de energía eléctrica y energía frigorífica se obtienen de dos fuentes principales: el

medidor de potencia instalado en campo y los sensores PT-100 instalados en el evaporador del equipo. El valor de la energía eléctrica se obtiene directamente del medidor de potencia, mientras que para calcular la energía frigorífica se hace uso de la relación matemática descrita anteriormente (ecuación 2). Con estos dos parámetros se calcula el COP del equipo.³ Los instrumentos para recoger esta información son:

- Medidor de potencia Eastron X96-5.
- Sensores de temperatura PT-100.
- Software de adquisición de datos EEM.
- Software de adquisición de datos NET SCADA 5.0.
- Registro de datos.

Los sensores PT-100 fueron calibrados mediante el instituto boliviano de normalización y calibración (IBNORCA) con trazabilidad a patrones nacionales (ver anexo I y II). El medidor Eastron X96-5 tiene certificación internacional IEC-62052-11:2003, equipo de medición de electricidad en corriente alterna y en conformidad a la norma EU directiva 2014/32/EU sobre instrumentos de medición anexo II, Módulo B (ver anexo III). El COP calculado se comparó con el COP reportado por el fabricante en su software online⁴ encontrándose una desviación máxima del 36% (ver anexo IV).

La experimentación tiene como base en un diseño factorial mixto, es decir se tiene tres factores, el primero con tres niveles y los restantes con dos niveles lo que se traduce en un arreglo factorial de 3x2x2 combinaciones, cuyo modelo estadístico es dado por la ecuación 5.

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \delta_m + \varepsilon_{ijkl}; \dots \left\{ \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, c \\ l = 1, 2, \dots, n \\ m = 1, 2, \dots, r \end{array} \right. \quad (5)$$

³ Este punto se profundiza en la capítulo IV, en el acápite de acciones preliminares.

⁴ <https://www.bitzer.de/websoftware>

Además, se debe considerar un factor de bloque, la temperatura ambiente, lo que significa que se tiene dos replicas con lo que el número total de tratamientos es de 24. Las pruebas o tratamientos fueron aleatorizados para eliminar la influencia de posibles factores externos al experimento. Con la aleatorización también se pretenden minimizar el efecto de variables que son de difícil control como: la temperatura ambiente, humedad ambiente, la carga térmica y fluctuaciones en la red eléctrica de alimentación.

Para reducir el efecto de factores externos incontrolables se agruparán los tratamientos por bloques de temperatura ambiente que directamente está relacionada con la carga térmica que se le aplica al Chiller. Es de esperar el efecto del factor de bloque sobre la respuesta, es decir, que la temperatura ambiente afecta directamente sobre el consumo energético y la eficiencia energética. Por esta razón se aplica el factor de bloque con dos niveles (véase tabla 2) y en cada bloque se corre el total de tratamientos, lo que al final se traduce en 24 corridas experimentales.

Tabla 2 Factor de Bloque

FACTOR BLOQUE	Nº BLOQUE	RANGO
TEMPERATURA AMBIENTE	1	15 °C – 25 °C
	2	26 °C – 37 °C

Fuente: Elaboración propia

Las corridas experimentales fueron desarrolladas bajo las mismas condiciones de carga térmica, tipo de producto, etapa de proceso y capacidad de operación, es decir:

- Cargar térmica: dos lotes de producción de 1000 kg cada uno.
- Tipo de producto: cúrcuma, cortada en rodajas.
- Etapa del proceso: secado
- Capacidad de operación parcial: 25%

Cada condición experimental (tratamiento) tuvo una duración de 4 horas de operación continua del chiller, durante las cuales se registraron las variables cada minuto. Entre tratamientos consecutivos se respetó una ventana de una hora con la nueva configuración estando el Chiller en operación para permitir que el sistema de control adopte las nuevas condiciones.

Resultados

Tabla 3 Resultados de la medición ordenado por bloques

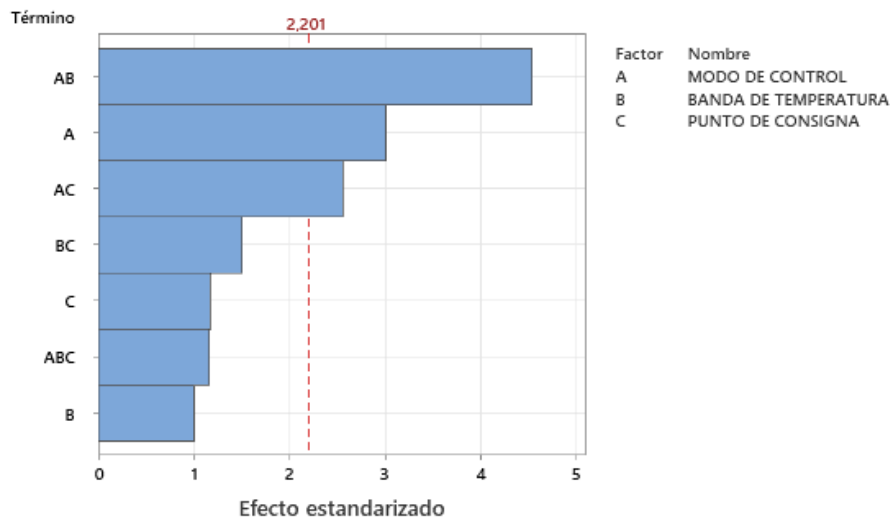
BLOQUE	MODO DE CONTROL ⁵	BANDA DE TEMPERATURA			
		5°C		8°C	
		PUNTO DE CONSIGNA		PUNTO DE CONSIGNA	
		7°C	7,5°C	7°C	7,5°C
1	PI	2,68	2,62	2,76	2,57
	PROP	2,56	2,30	2,71	2,93
	INT	3,05	2,97	2,73	2,65
2	PI	2,30	1,64	2,18	1,95
	PROP	1,93	1,85	2,18	2,36
	INT	2,21	2,52	2,01	2,21

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos de las observaciones fueron organizados de acuerdo a la tabla 3, donde se indican el valor de los COP correspondientes a cada medida experimental. A partir de estos resultados se procede a realizar el análisis de varianza, para obtener los efectos principales, los efectos de interacción, el efecto del bloque y las significancias respectivas. Con los datos de la tabla 3 y el modelo estadístico planteado por la ecuación 4, se obtiene el análisis de varianza del modelo. Para comprender gráficamente los efectos del modelo se realiza el diagrama de Pareto de efectos estandarizados (figura 2), con un nivel de significancia de 0.05, donde se presentan los valores absolutos de los factores que tiene mayor efecto hasta los que tiene menor efecto sobre la respuesta. En el diagrama no se toma en cuenta el factor de bloque porque el objetivo de la presente investigación es determinar los efectos de los factores de interés.

⁵ Son tres los modos de control estudiados: PI: modo proporcional integral. INT: modo integral. PROP: modo proporcional.

Figura 21 Diagrama de Pareto para el análisis ANOVA



Fuente: Elaboración propia en Minitab

Como solo tres efectos de los siete efectos son significativos, se procedió a determinar el mejor ANOVA para la investigación, es decir que para el análisis se considera solo los factores significativos y aquellos que se encuentren muy cerca de la significancia (tabla 4). Con esta consideración se procede a eliminar los efectos menos importantes para obtener un mejor análisis de varianza del modelo, más simplificado para explicar el comportamiento del COP durante la experimentación. De manera simultánea a la medida de parámetros eléctricos y temperaturas, se procedió al registro de los arranques de los compresores; en el anexo VI se presenta el número de arranques promedios por hora de los modos de control agrupados por bloques.

Tabla 4 El mejor ANOVA para el experimento

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	2,9768	0,42525	23,56	0,000
Bloques	1	2,1588	2,15878	119,58	0,000
Lineal	2	0,2112	0,10562	5,85	0,012
MODO DE CONTROL (A)	2	0,2112	0,10562	5,85	0,012
Interacciones de 2 términos	4	0,6067	0,15168	8,40	0,001
AxB	2	0,4475	0,22374	12,39	0,001
AxC	2	0,1593	0,07963	4,41	0,030
Error	16	0,2888	0,01805		
Total	23	3,2656			

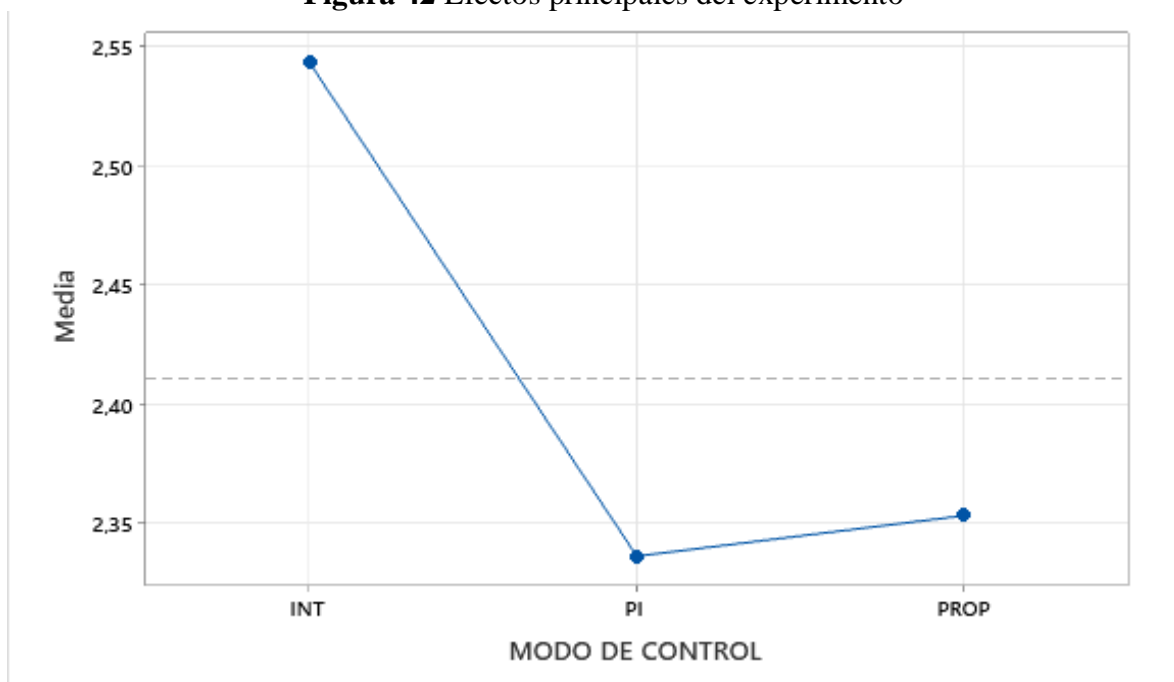
Fuente: Elaboración propia en Minitab

Discusión

De acuerdo con la tabla 4, los factores banda de temperatura y punto de consigna no tiene efecto significativo sobre la respuesta. Por lo que su impacto puede ser descartado del análisis. Lo mismo ocurre para la interacción triple y la interacción entre la banda de temperatura y el punto de consigna. Las otras dos interacciones dobles restantes tienen efecto sobre la respuesta, esto porque el modo de control por sí solo ya tiene efecto y dependiendo de cómo se lo combine con los demás factores tendrá influencia directa sobre la respuesta.

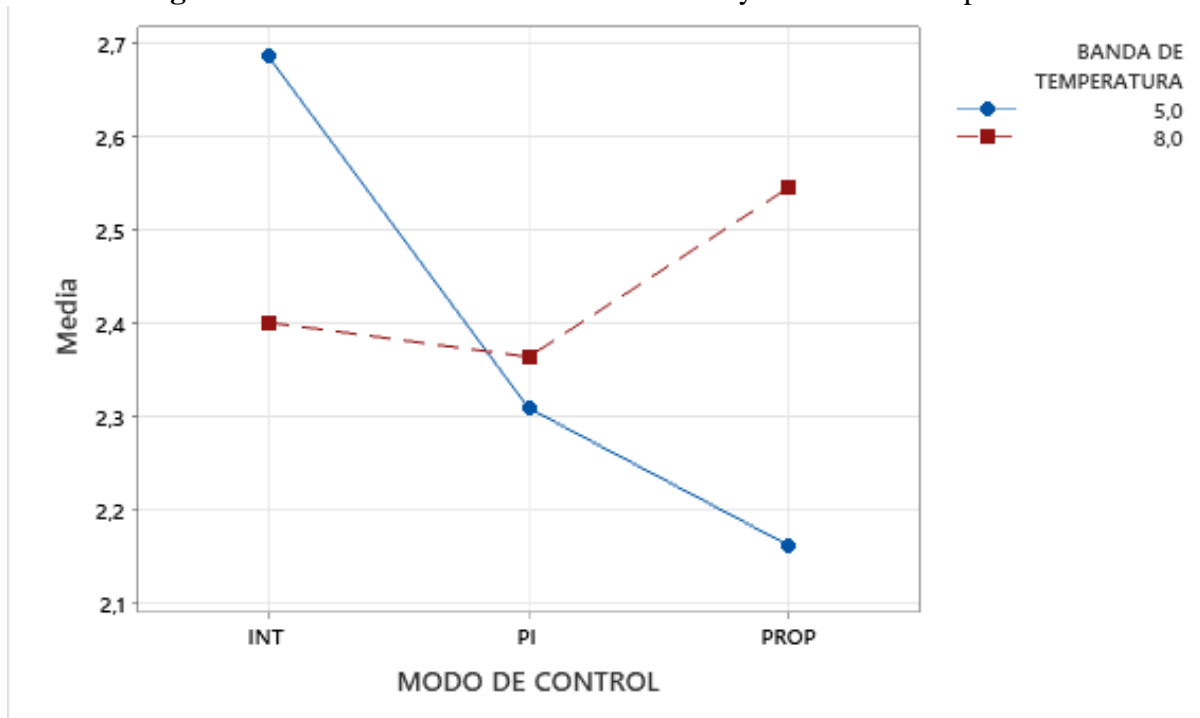
En el diagrama de Pareto (figura 2) claramente se observa que tres de los siete términos si tienen efecto significativo sobre la variable de respuesta. Con el mejor ANOVA (tabla 4) se confirma que el efecto del modo de control (A) sobre la variable de respuesta es significativo. Además, los efectos de interacción de AB y AC, también son significativos. Para profundizar más este análisis se procede a graficar los efectos principales y los efectos de interacción.

Figura 42 Efectos principales del experimento



Fuente: Elaboración propia en Minitab

Figura 5 Interacción entre el modo de control y la banda de temperatura

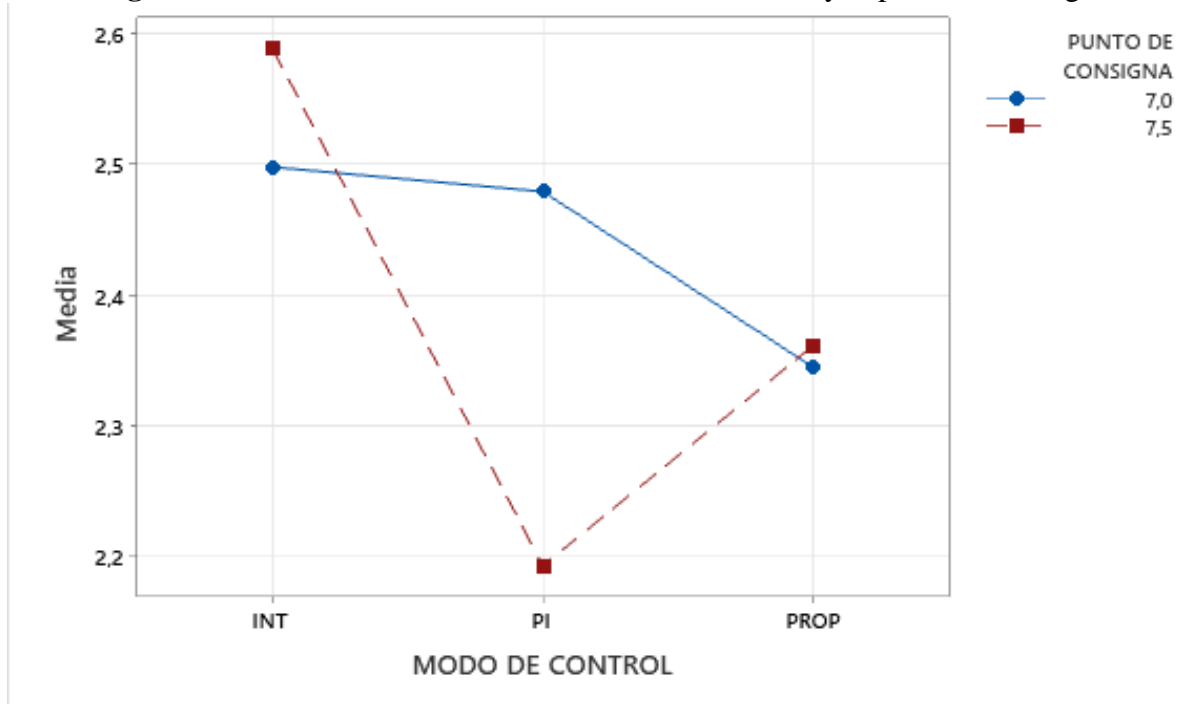


Fuente: Elaboración propia en Minitab

El modo de control integral, “INT”, tiene un mayor efecto sobre el COP, y su valor se encuentra por encima de la media de la media global. También se puede ver que el control proporcional “PROP”, y el control proporcional – integral, “PI” casi tiene una misma media, donde el modo de control proporcional presenta una leve ventaja (figura 4).

En cuanto a las interacciones, se encontró que la combinación INT con banda de temperatura de 5.0 °C produjo el mejor desempeño global, mientras que la combinación PROP con banda de 5.0 °C tuvo el peor rendimiento. Este resultado es novedoso porque la literatura existente (Seo y Lee, 2016; Chen et al., 2026) no ha analizado explícitamente la interacción entre el modo de control y la banda de temperatura. La explicación técnica radica en que una banda estrecha (5.0 °C) en modo PROP provoca ciclos de arranque-paro más frecuentes y una respuesta oscilatoria que reduce el COP, mientras que en modo INT la misma banda estrecha permite una modulación más suave y estable, aprovechando la capacidad de la acción integral para eliminar el error acumulado sin generar inestabilidad (figura 5).

Figura 6 Efecto de interacción entre el modo de control y el punto de consigna



Fuente: Elaboración propia

Con relación al punto de consigna, se observó que el modo INT tiene un mejor desempeño a 7.5 °C, mientras que el modo PI lo tiene a 7.0 °C, y el modo PROP es prácticamente insensible a esta variable. Este comportamiento no ha sido documentado previamente en la literatura revisada (Xin et al., 2024; Borkowski, 2022), lo que constituye un aporte original del presente estudio. Desde una perspectiva termodinámica, operar a un punto de consigna más alto (7.5 °C) reduce la diferencia de temperatura entre el evaporador y el ambiente, disminuyendo la potencia de compresión requerida, pero esto solo es aprovechado efectivamente por el modo INT debido a su capacidad de ajustar continuamente la salida sin sobrepasos- De manera general el modo INT tiene el mejor desempeño independientemente del punto de consigna (figura 6).

En el mejor ANOVA de la investigación se muestra que el modo de control tiene efecto sobre el COP, eso significa que la media al menos uno de los modos es diferente que los demás. Como el modo de control tiene tres niveles se tendrá tres pares de hipótesis, es decir:

$$H_0: \mu_{M1} = \mu_{M2} \quad ; \quad H_0: \mu_{M1} = \mu_{M3} \quad ; \quad H_0: \mu_{M2} = \mu_{M3}$$

$$H_A: \mu_{M1} \neq \mu_{M2} \quad ; \quad H_A: \mu_{M1} \neq \mu_{M3} \quad ; \quad H_A: \mu_{M2} \neq \mu_{M3}$$

Para la prueba se tiene tres pares de hipótesis. Para probar estas hipótesis se usa el método LSD, que consiste en calcular las diferencias muestrales en valor absoluto y compararlas con la diferencia mínima significativa.

Tabla 51 Resultados de la prueba LSD

Diferencia Muestral	Valor	Relación	LSD	Conclusión
PI-PROP	$= 18,7-18,82 /8$	0,0150	<	0,1424 NO SIGNIFICATIVA
PI-INT	$= 18,7-20,35 /8$	0,2063	>	0,1424 SIGNIFICATIVA
PROP-INT	$= 18,82-20,35 /8$	0,1913	>	0,1424 SIGNIFICATIVA

Fuente. Elaboración propia

El hallazgo principal de esta investigación es que, en un chiller industrial de 360 kW operando al 25% de su capacidad nominal para un proceso de liofilización, el modo de control puramente integral (INT) produce un COP significativamente superior (2,54) en comparación con los modos proporcional (PROP: 2,35) y proporcional-integral (PI: 2,34). La prueba LSD confirma que el modo INT es estadísticamente diferente de PROP y PI, mientras que estos últimos forman un grupo homogéneo sin diferencias significativas entre sí (tabla 5). Este resultado desafía la noción convencional de que el controlador PI es siempre superior a sus componentes por separado. En condiciones de carga parcial extrema, la acción integral dentro de un PI puede generar sobrepasos y oscilaciones que degradan el COP, mientras que el modo INT puro evita estos efectos adversos. Desde una perspectiva práctica, este hallazgo implica que, para la planta estudiada, reconfigurar el chiller al modo INT con banda de temperatura de 5,0 °C y punto de consigna de 7,5 °C representa una mejora del 8,1% en el COP sin inversión adicional, lo que se traduce en un ahorro estimado de Bs. 36.450 anuales.

Desde una perspectiva del control automático, los resultados desafían la noción de que la combinación proporcional-integral (PI) es siempre superior a sus componentes por separado. En sistemas altamente no lineales y con restricciones de operación (como un chiller a baja carga), la acción integral puede generar efectos adversos que degradan el desempeño energético. Este hallazgo sugiere la necesidad de revisar los modelos de control para condiciones de carga parcial extrema, proponiendo que la sintonía del integrador debe ser adaptativa o, en algunos casos, suprimida.

Aunque no se presentó el análisis estadístico del número de arranques en los resultados mostrados, se infiere que el modo INT, al operar con una banda estrecha y una acción integral continua, reduce la frecuencia de conmutaciones del compresor en comparación con el modo PROP. Esto extiende la vida útil del compresor y reduce los costos de mantenimiento, un beneficio adicional no cuantificado en el ahorro energético.

Por último, se verifica el cumplimiento de los supuestos del modelo con la prueba de la normalidad, la igualdad de varianzas e independencia de los residuos (anexo V).

Conclusiones

La presente investigación confirma el efecto significativo que tiene la temperatura ambiente en la eficiencia energética de los sistemas de refrigeración de los Chillers enfriados por aire. Por otro lado, el modo de control sí importa, pero el efecto de interacción dependerá de cómo se lo combine, es decir que tiene un comportamiento distinto según cual sea la banda de temperatura y el punto de consigna. De esta manera se puede decir que el punto óptimo donde se maximice el COP, depende de las combinaciones específicas entre el modo de control, la banda de temperatura y el punto de consigna.

El análisis de varianza para los factores de tratamiento reveló que el efecto principal del factor modo de control sobre el COP es estadísticamente significativo. En consecuencia, se rechaza la Hipótesis Nula (H_0) y se acepta la Hipótesis Alternativa (H_1), concluyendo que existe evidencia estadística suficiente para afirmar que al menos un modo de control influye en la eficiencia energética (COP) del Chiller. Mediante la prueba LSD de comparación de medias se observa que el modo de control integral (INT) es significativamente diferente de ambos modos: proporcional (PROP) y proporcional-integral (PI). El modo proporcional y el modo proporcional-integral forman un grupo homogéneo al no encontrarse diferencia significativa entre ambos modos de control.

Se observó que el modo de control INT, combinado con una banda de temperatura 5,0°C y un punto de consigna de 7,5°C presentó un mejor rendimiento frente a las demás combinaciones. Por ello, este modo de control tiene mejor desempeño a nivel general y depende fuertemente de la combinación con los niveles de los demás factores. Estadísticamente, el modo de control

integral es el factor de mayor influencia positiva en el COP dentro del espacio experimental definido.

Más allá del COP, se observó una diferencia operativa crítica. El modo Integral redujo drásticamente la frecuencia de ciclos de arranque-paro de los compresores a un promedio de 5 por ciclo, frente a promedios de hasta 25 ciclos con los modos P y PI. Esta variable, aunque posiblemente no incluida en el modelo ANOVA original como respuesta, es un indicador robusto de estabilidad del sistema y se correlaciona positivamente con la eficiencia de largo plazo y la reducción del desgaste mecánico. La diferencia es sustancial, y con estas observaciones el mejor modo de control, es del modo integral porque es que mejor se adapta a los requerimientos operativos del proceso. No se observó impactos negativos en los equipos y en el proceso debido a la actuación de este modo de control.

Dada la evidencia de interacciones significativas de segundo orden entre los factores, se recomienda una fase posterior de optimización utilizando una metodología de Superficie de Respuesta (RSM). Este enfoque permitirá modelar matemáticamente la relación entre los factores (Modo INT, Banda de temperatura, punto de Consigna, y posiblemente Temperatura Ambiente) y las respuestas (COP, Ciclos de Arranque), identificando con precisión la región óptima operativa. Específicamente, se propone ampliar el rango de estudio de la banda de temperatura, incluyendo un nivel superior, para evaluar si existe un punto de equilibrio que maximice la eficiencia global minimizando el trabajo del compresor.

Si bien los equipos son ajustados por los fabricantes de acuerdo a requerimiento de los clientes, muchas veces se tiene cambios en las condiciones operativas que afectan directamente al desempeño, en especial en equipos como los Chiller que depende fuertemente de las condiciones ambientales, la carga térmica y el requerimiento del proceso. Por esta razón, este tipo de equipos deben ser flexibles ante estos cambios por dos objetivos principales: uno, mejorar la eficiencia energética, porque es el equipo que mayor consumo energético tiene en una instalación y dos, para salvaguardar la integridad del equipo. El punto óptimo será aquel en donde se tome en cuenta la integridad del equipo, el medio ambiente, la seguridad del proceso y la eficiencia energética.

Los patrones de respuesta observados (reducción drástica de ciclos con el modo integral, sensibilidad a las interacciones) son el resultado de la lógica de control predefinida del

fabricante actuando sobre las dinámicas físicas del Chiller. Es necesario comprender la lógica de control. Por esa razón, un siguiente paso para profundizar más esta investigación, es desarrollar un modelo matemático que integre un modelo termodinámico y un modelo de los algoritmos de los sistemas de control. Posteriormente realizar la simulación para verificar el comportamiento de sistema esperado con el sistema real. Este paso convierte la investigación de un estudio empírico-correlacional en uno con capacidad explicativa y predictiva, cerrando el ciclo entre la observación experimental y la teoría de control aplicada.

Referencias bibliográficas

- Burba, M. (2013). Improved energy efficiency of air cooled chillers. *REHVA journal*, 50-53. Recuperado de https://www.rehva.eu/fileadmin/hvac-dictio/01-2013/Improved_energy_efficiency_of_air_cooled_chillers.pdf
- Fraile, J. (2012). *Circuitos Electricos*. Madrid: Pearson Educación S.A. Recuperado de <https://archive.org/details/circuitoselectricosjesusfrailemorap>
- Chen, D., Gong, Y., Chen, J., & He, R. (2026). The evolution and future of advanced control strategies for chiller plant sequence and optimal loading in buildings: a review of modern control theory and artificial intelligence algorithms. *Science Direct: Energy and Buildings*, 50-62. doi:10.1016/j.enbuild.2026.117578. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778826006389>
- Gomariz, S., Biel, D., Matas, J., & Reyes, M. (2000). Teoría Del Control. Diseño Electronico. Barcelona: *Upc*. Recuperado de <https://sdc5a6e66b71c5059.jimcontent.com/download/version/1282529489/module/4377146565/name/Teoria%20de%20control.pdf>
- Gonzales, C. (2012). Refrigeración Industrial: montaje y mantenimiento de instalaciones frigoríficas. España: Cano Pina, S.L.- *Ediciones Ceysa*. Recuperado de <https://pdfcoffee.com/diseo-y-calculo-de-instalac-gonzalez-carlos-author-pdf-pdf-free.html>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. P. (2018). *Metodología De La Investigación, Las Rutas Cuantitativa, Cualitativa Y Mixta*. Mexico : Mcgrawhill. Recuperado de

http://www.biblioteca.cij.gob.mx/archivos/materiales_de_consulta/drogas_de_abuso/articulos/sampierilasrutas.pdf

- Lin, X., Shan, K., & Wang, S. (2025). Model predictive control of large chiller plants for enhanced energy efficiency utilizing inherent cold storage of cooling systems. *Elsiever*, 1-12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115697>. Recuperado de <https://ira.lib.polyu.edu.hk/handle/10397/111353>
- Ogata, K. (2010). *Ingenieria de Control Moderna* (Quinta ed.). Madrid: Pearson Education S.A. Recuperado de <https://ingenierovizcaino.com/material/libros/sd/ingenieria-de-control-moderna-ogata-5ed.pdf>
- Seo, B., & Lee, K. (2016). Detailed analysis on part load ratio characteristics and cooling energy saving of chiller staging in an office building. *Energy and Buildings*, 119, 309–322. recuperado de https://www.researchgate.net/publication/299460419_Detailed_Analysis_on_Part_Load_Ratio_Characteristics_and_Cooling_Energy_Saving_of_Chiller_Staging_in_an_Office_Building_under_Korean_Climatic_Conditions
- Wan, H., Gong, Y., Wang, S., Sun, Y., Xu, T., & Huang, G. (2024). Generic load regulation strategy for enhancing energy efficiency of chiller plants. *Building Simulation*, 1273-1287. doi:<https://doi.org/10.1007/s12273-024-1138-1>. Recuperado de [https://scholars.cityu.edu.hk/en/publications/publication\(30a52874-133e-45f7-940e-3672fea7b0be\).html](https://scholars.cityu.edu.hk/en/publications/publication(30a52874-133e-45f7-940e-3672fea7b0be).html)
- Xin, X., Zhang, Z., Zhou, Y., Lui, Y., Wang, D., & Shuo, N. (2024). A comprehensive review of predictive control strategies in heating, ventilation, and air-conditioning (HVAC): Model-free VS model. *Elsiever*, 1-24. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S235271022401581X>
- Yamamoto, T., Hayama, H., & Hayashi, T. (2020). Formulation of Coefficient of Performance Characteristics of Water-cooled Chillers and Evaluation of Composite COP for Combined Chillers. *MDPI*, 1-20. Recuperado de <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/5/1182>

Anexos

Anexo I. Certificación internacional IEC-62052-11:2003

SGS



**TEST REPORT FOR THE PATTERN AND
CONSTRUCTION OF ELECTRICITY METERS**

MANUFACTURER : *Zhejiang Eastron Electronic Co. Ltd*
TYPE : *Smart X96*
CLASS : *0.5 S (kWh)*
DESCRIPTION : *Polyphase, Active Import/Export (kWh), Transformer Operated,
Multi- function, Electricity Meter*

Tested in accordance with IEC 62052-11: 2003, Electricity metering equipment (AC) – General requirements, tests and test conditions.
Part 11: Metering equipment.

and

IEC 62053-22: 2003, Electricity metering equipment (AC) – Particular requirements
Part 21: Static meters for active energy (classes 0.2 S & 0.5 S).

The meters tested satisfied the required specification.

ISSUED BY:

Keith Hunter

SGS REFERENCE NO.: EMA276513/1/IEC//X96

REPORT ISSUE DATE: 11th March 2020

REPORT ISSUE No.: 1

This document is issued by the Company subject to its General Conditions of Service, available on request or accessible at <http://www.sgs.com/en/Terms-and-Conditions.aspx>.

Attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any holder of this document is advised that information contained hereon reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and this document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. This document cannot be reproduced except in full, without prior written approval of the Company. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.

Unless otherwise stated the results shown in this test report refer only to the sample(s) tested and such sample(s) are retained for 28 days only.

Tests marked (*) are not UKAS accredited, in addition any opinions or interpretations expressed herein are outside the scope of the UKAS accreditation.

DU-EMA-RT-006 (Version 1)

Page 1 of 57

SGS United Kingdom Ltd 12a & 12b Bowburn South Industrial Estate Bowburn Durham DH6 5AD t +44 (0)191 377 2000 f +44 (0)191 377 2020 www.sgs.com

Member of the SGS Group (SGS SA)
Registered in England No. 1193985 Registered Office: Rossmore Business Park, Ellesmere Port, Cheshire CH65 3EN

Anexo II. EU directiva 2014/32/EU sobre instrumentos de medición anexo II, Módulo B

SGS

EU Type Examination Certificate Number: **0120/SGS0288**

Zhejiang Eastron Electronic Co., Ltd.

No.52, Dongjin Road
Nanhu
Jiaxing
Zhejiang
China

Instrument Identification:
Smart X96 Series

Polyphase, Active Import/Export (kWh), Indoor, Transformer Operated, Multi-function, Electricity Meter

Instrument Traceable Number
0120/SGS0288

has been assessed and certified as meeting the requirements of

EU Directive 2014/32/EU
on Measuring Instruments Annex II, Module B

It is certified that the manufacturer's technical design and specimen for the above instrument has been examined and, based on the evidence submitted, it is considered that the instrument conforms to the requirements of Annex V of EU Directive 2014/32/EU

This certificate must be used in conjunction with a certificate covering the product verification as required in Annex II, Module D or Annex II, Module F

This certificate is valid until 23rd April 2027
Issue 1

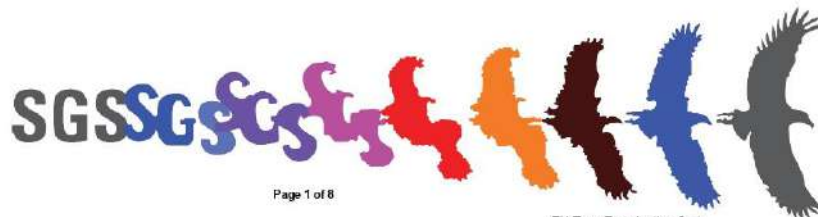
Certification is based on report number(s) EMA234440/2 dated 24th April 2017

Authorised Signature



Mikko Välimäki

SGS Finko OY, Notified Body 0598
Takomotie 8, FI-00380 Helsinki, Finland
t +358 9 6963 61 www.sgs.fi



Anexo III. Certificados de calibración de los sensores PT-100.

	INSTITUTO BOLIVIANO DE METROLOGÍA		ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA	MINISTERIO DE DESARROLLO PRODUCTIVO Y ECONOMÍA PLURAL
CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN		LP-CCT-1886-2024		
Laboratorio: Temperatura		Telefono: (+591 2) 2372046 int. 330 – 331		
Solicitante:	PLANTA DE LIOFILIZACION PALOS BLANCOS			
Dirección:	PALOS BLANCOS La Paz - Bolivia			
Instrumento:	Termómetro de resistencia de platino Alcance de Medición: desde -50 °C hasta 300 °C Resolución: 0,1 °C Inmersión: Total			
Marca:	Indicador: OMRON ; Sensor: No indica			
Modelo:	Indicador: NB10W-TW01B ; Sensor: No indica			
Número de serie:	Indicador: No indica ; Sensor: No indica			
Identificación interna:	Indicador: 0000AB2C93C ; Sensor: LYO 3 PROD. 1			
Lugar de calibración:	Área de Máquinas - Cámara de Secado 3			
Fecha de calibración:	2024-07-03			
Fecha de emisión	2024-07-05			
Número de páginas del certificado:	2			
Elaborado por:		Autorizado por:		
	Alain Christian Paz Araoz Auxiliar de Laboratorio de Temperatura y Humedad, Auxiliar - 9		Ana Maria Bernabe Mamani Responsable de Laboratorio de Termometría y Electricidad	CS:d567ecad
Factura N°: 29142		Cotización: CTZ-DMIC-01426-2024		
ADVERTENCIA: El presente certificado autoriza el uso del Instrumento para fines propios del solicitante. No constituye autorización legal de uso para la certificación metrológica a terceros y no puede ser reproducido sin la autorización escrita del IBMETRO, salvo que la reproducción sea total. El presente documento se emite de acuerdo a la Ley Nacional de Metrología (DL15380 de 1978-03-28).				
				N° 0463173
LA PAZ: Av. Camacho No. 1488 - Telf./Fax (+591 2) 2372046, 2310037, 2147945 COCHABAMBA: Calle Tumusla No. 510 esq. México - Telf./Fax (+591 4) 4520856 SANTA CRUZ: Calle Combate Bella Flor N° 3230 - Telf./Fax (+591 3) 9410922	TARIJA: Calle Ingavi N° 156 Edif. Coronado Piso 2 of. 204 Telf./Fax (+591 4) 6658866 SUCRE: Parque Tecnológico, Lajastambo (Carretera Sucre - Ravelo) - Telf. (+591) 7155129 RIBERALTA: Av. Amazonica S/N CADEXNOR - Telf./Fax (+591) 67359342 COBILJA: Carretera Porvenir km 14,5 Zona Franca - Telf. (+591) 71525861			

Fuente. Documentos internos de la empresa



INSTITUTO BOLIVIANO
DE METROLOGÍA



ESTADO PLURINACIONAL DE
BOLIVIA

MINISTERIO DE DESARROLLO
PRODUCTIVO Y ECONOMÍA PLURAL

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

LP-CCT-1880-2024

Laboratorio: Temperatura

Telefono: (+591 2) 2372046 int. 330 - 331

Solicitante: PLANTA DE LIOFILIZACION PALOS BLANCOS

Dirección: PALOS BLANCOS
La Paz - Bolivia

Instrumento: Termómetro de resistencia de platino

Alcance de Medición: desde -50 °C hasta 300 °C
Resolución: 0,1 °C
Inmersión: Total

Marca: Indicador: OMRON ; Sensor: No indica

Modelo: Indicador: NB10W-TW01B ; Sensor: No indica

Número de serie: Indicador: No indica ; Sensor: No indica

Identificación interna: Indicador: 00000AB2C305 ; Sensor: LYO 1 PROD. 1

Lugar de calibración: Área de Máquinas - Cámara de Secado 1

Fecha de calibración: 2024-07-03

Fecha de emisión: 2024-07-05

Número de páginas del certificado: 2

Elaborado por:

Autorizado por:

Alain Christian Paz Aroz
Auxiliar de Laboratorio de Temperatura
y Humedad, Auxiliar - 9

Ana Maria Bernabe Mamani
Responsable de Laboratorio de
Termometría y Electricidad



CS:51e54734

Factura N°: 29142

Cotización: CTZ-DMIC-01426-2024

ADVERTENCIA: El presente certificado autoriza el uso del instrumento para fines propios del solicitante. No constituye autorización legal de uso para la certificación metroológica a terceros y no puede ser reproducido sin la autorización escrita del IBMETRO, salvo que la reproducción sea total. El presente documento se emite de acuerdo a la Ley Nacional de Metrología (DL15380 de 1978-03-28).

N° 0463167

LA PAZ: Av. Camacho No. 1488 - Telf./Fax (+591 2) 2372046, 2310037, 2147945
COCHABAMBA: Calle Tumusla No. 510 esq. México - Telf./Fax (+591 4) 4520856
SANTA CRUZ: Calle Combate Bella Flor N° 3230 - Telf./Fax (+591 3) 3410922

TARIJA: Calle Ingavi N° 156 Edif. Coronado Piso 2 of. 204 Telf./Fax (+591 4) 6658866
SUCRE: Parque Tecnológico, Lajastambo (Carretera Sucre - Ravelo) - Telf. (+591) 7155129
RIBERALTA: Av. Amazonica S/N CADEXNOR - Telf./Fax (+591) 67359342
COBIJA: Carretera Porvenir km 14,5 Zona Franca - Telf. (+591) 71525861

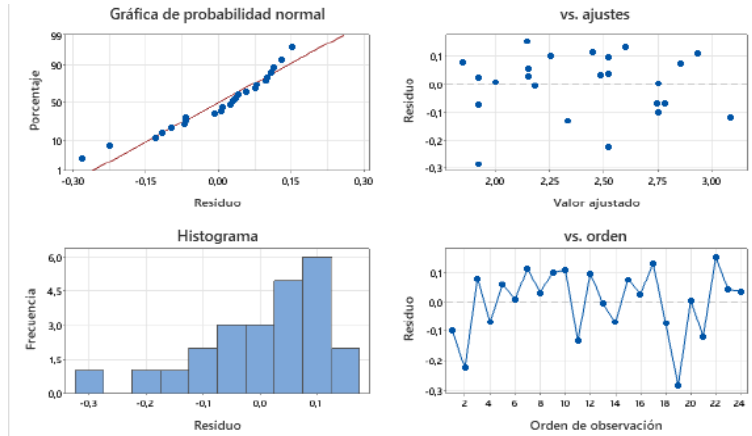
Escaneado con CamScanner

Anexo IV. Resultados de análisis de la unidad 1 (izquierda) y unidad 2 (derecha)

Categoría	Parámetro	Valor	Categoría	Parámetro	Valor
Valores de Entrada	Modelo de compresor	CSH9593-240Y	Valores de Entrada	Modelo de compresor	CSH9533-240Y
	Refrigerante	R134a		Refrigerante	R134a
	Temp. referencia	Punto de rocío		Temp. referencia	Punto de rocío
	SST evaporación	-0,74 °C		SST evaporación	1,50 °C
	SDT condensación	37,7 °C		SDT condensación	43,0 °C
	Subenfriamiento líquido	9,00 K		Subenfriamiento líquido	10,10 K
	Supercalentamiento succión	4,70 K		Supercalentamiento succión	8,80 K
	Supercalentamiento útil	100%		Supercalentamiento útil	100%
	Modo de operación	Estándar		Modo de operación	Estándar
	Alimentación eléctrica	400V-3-50Hz		Alimentación eléctrica	380V-3-50Hz
	Control de capacidad	25%		Control de capacidad	25%
	Enfriamiento adicional	Automático		Enfriamiento adicional	Automático
	Temp. máx. descarga	110 °C		Temp. máx. descarga	110 °C
Resultados	Compresor	CSH9593-240Y-40D	Resultados	Compresor	CSH9533-240Y-38D
	Capacidad frigorífica	177,5 kW		Capacidad frigorífica	182,3 kW
	Capacidad de evaporación	177,5 kW		Capacidad de evaporación	182,3 kW
	Potencia absorbida	63,2 kW		Potencia absorbida	71,4 kW
	Corriente (400V)	131,6 A		Corriente (380V)	148,2 A
	Rango de voltaje	380-415V		Rango de voltaje	360-400V
	Capacidad de condensación	241 kW		Capacidad de condensación	254 kW
	COP/EER	2,81		COP/EER	2,55
	Flujo másico LP	3945 kg/h		Flujo másico LP	4080 kg/h
	Flujo másico HP	3945 kg/h		Flujo másico HP	4080 kg/h
	Modo operación	Estándar		Modo operación	Estándar
	Temp. líquido	28,7 °C		Temp. líquido	32,9 °C
	Caudal de aceite	1,12 m³/h		Caudal de aceite	1,25 m³/h
Temp. descarga sin enfriamiento	75,7 °C	Temp. descarga sin enfriamiento	87,4 °C		

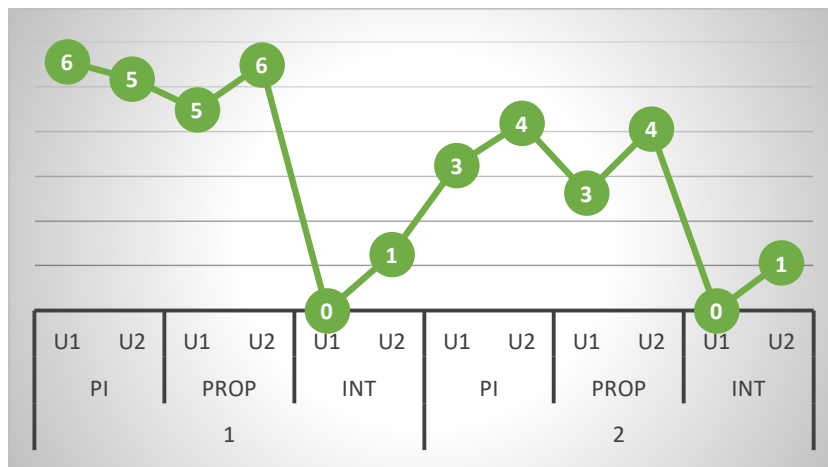
Fuente: Elaboración propia en base a los resultados de Bitzer Software v7.0.5

Anexo V. Gráficas de los supuestos del modelo



Fuente: Elaboración propia en Minitab

Anexo VI. Número de arranques por hora



Fuente. Elaboración propia

Declaraciones finales

Conflicto de intereses: El autor declara que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento: No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento: NA

Nota editorial: El artículo no es producto de una publicación anterior.