# Revista de Investigación Multidisciplinaria

# CTSCAFE PARA CIUDADANOS.....

http://www.ctscafe.pe

ISSN 2521-8093




**Volumen X- N°30 NOVIEMBRE 2026**

**http;//www.ctscafe.pe**

**Lima - Perú**

REVISTA DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA

CTS CAFE Para ciudadanos…

http://www.ctscafe.pe

Volumen X- N° 30 Noviembre 2026

ISSN 2521-8093

# Análisis termodinámico de la disipación de calor y eficiencia exergética en sistemas de refrigeración de centros de datos

Sr. Sebastián Andre Angulo Saman
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Correo electrónico: sebastian.angulo@unmsm.edu.pe

Sr. Diego Brayan Huarcusi Candia
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Correo electrónico: diego.huarcusi@unmsm.edu.pe

Sr. Jhorel Jorge Lopez Conislla
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Correo electrónico: jorge.lopezc@unmsm.edu.pe

Sr. Jaime Elías Barrientos Huamani
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Correo electrónico: jaime.barrientos@unmsm.edu.pe



Recibido: 07 Septiembre 2026 Aceptado:10 Noviembre 2026

**Resumen:** El interés generado por los centros de datos ha experimentado un crecimiento exponencial en el transcurso de las últimas décadas. Dicho interés ha permitido a la industria de los centros de datos aumentar la eficiencia espacial de la maquinaria involucrada, dejando de lado las abismales proporciones de las anteriores generaciones. A pesar de ello, este aumento no fue proporcional a las crecientes demandas energéticas de los equipos modernos, ni resultó igualmente eficaz para la disipación del calor residual generado por sus operaciones. Este desequilibrio entre el calor excedente y las crecientes demandas energéticas de los centros de datos ha despertado un mayor interés por la optimización de los sistemas de refrigeración, procurando reducir el gasto energético destinado a su funcionamiento en relación con la cantidad de calor disipado.

Como parte del estudio de los principales sistemas de refrigeración utilizados en la industria, se determinará cuál de los sistemas de enfriamiento —el sistema DX in-row (expansión directa), el sistema CW in-row (agua enfriada o chilled water) y el sistema CRAH (Computer Room Air Handler) con chiller central y torre de enfriamiento— presenta la mayor eficiencia exergética, diferenciando los conceptos de COP y exergía como una alternativa a la forma tradicional de medir la eficiencia de un sistema de refrigeración, representado por el refrigerador de Carnot.

**Palabras Clave:** Centros de datos/ Sistemas de refrigeración/ Analisis Exergetico/ COP

**Abstract:** Interest in data centers has grown exponentially over the past few decades. This growing interest has enabled the data center industry to increase the spatial efficiency of the equipment involved, significantly reducing the space required compared with previous generations. Despite these advances, such improvements have not been proportional to the increasing

energy demands of modern equipment, nor have they been equally effective in dissipating the residual heat generated during operation. This imbalance between excess heat and the ever-increasing energy demands of data centers has sparked greater interest in optimizing cooling systems, with the aim of reducing the energy consumption associated with their operation relative to the amount of heat dissipated.

As part of the study of the main cooling systems currently used in the industry, this research will determine which of the following cooling technologies—the DX in-row (direct expansion) system, the CW in-row (chilled-water) system, or the CRAH (Computer Room Air Handler) system with a central chiller and cooling tower—achieves the highest exergetic efficiency. To this end, the concepts of COP and exergy are distinguished, proposing exergy as an alternative to the traditional approach for evaluating the efficiency of refrigeration systems, taking the Carnot refrigerator as the reference model.

**Keywords:** Data centers / Cooling systems / Exergetic analysis / COP

**Résumé :** L'intérêt suscité par les centres de données a connu une croissance exponentielle au cours des dernières décennies. Cet engouement a permis au secteur des centres de données d'améliorer l'efficacité spatiale des équipements, en s'éloignant des dimensions démesurées qui caractérisaient les générations précédentes. Toutefois, cette amélioration ne s'est pas faite proportionnellement aux besoins énergétiques croissants des équipements modernes, et ne s'est pas non plus révélée aussi efficace pour dissiper la chaleur résiduelle générée par leur fonctionnement. Ce déséquilibre entre l'excédent de chaleur et la demande énergétique croissante des centres de données a suscité un intérêt accru pour l'optimisation des systèmes de refroidissement, l'objectif étant de réduire la consommation d'énergie nécessaire à leur fonctionnement par rapport à la quantité de chaleur dissipée.

Dans le cadre de l'étude des principaux systèmes de refroidissement utilisés dans l'industrie, nous déterminerons lequel — parmi le système « in-row » à détente directe (DX), le système « in-row » à eau glacée (CW) et le système CRAH (Computer Room Air Handler) associé à un groupe froid central et une tour de refroidissement — présente la meilleure efficacité exergétique. Cette approche permet de distinguer les concepts de COP et d'exergie, offrant ainsi une alternative à la méthode traditionnelle d'évaluation de l'efficacité d'un système de refroidissement, laquelle se réfère au cycle de Carnot.

**Mots-clés :** Centres de données / Systèmes de refroidissement / Analyse exergétique / COP



## 1. Introducción

El desarrollo de sistemas eficientes para la refrigeración en los centros de datos puede percibirse como una innovación propia de un futuro distante; sin embargo, tanto estos sistemas como los propios centros de datos poseen una trayectoria más antigua de lo que comúnmente se supone. Según Susnjara y Smalley (s.f.), los antecedentes de los centros de datos modernos se remontan a la década de 1940, cuando comenzaron a construirse instalaciones dedicadas exclusivamente al funcionamiento de grandes equipos de cómputo. El Electrical Numerical Integrator and Computer (ENIAC) del ejército de los Estados Unidos, completado en 1945 dentro de la Universidad de Pensilvania, es un pronto ejemplo de un centro de datos que, como sus contrapartes

actuales, requería de un espacio especializado para albergar sus dimensiones y satisfacer sus necesidades operativas.

Con el paso de las décadas, los avances en la tecnología informática permitieron una reducción progresiva del tamaño físico de los equipos y un aumento en su capacidad de procesamiento.

En la década de 1990, los microordenadores (dispositivos de computación de sobremesa o portátil, que utilizan un microprocesador como su CPU) entraron en escena y, en consecuencia, el espacio requerido para las operaciones asociadas a las tecnologías de la información (TI) disminuyó considerablemente. Estos microordenadores que empezaron a llenar las antiguas salas de los ordenadores mainframe pasaron a conocerse como "servidores", y las salas, como espacio físico, pasaron a denominarse "centros de datos".

La industria de los centros de datos ha experimentado un crecimiento dramático en las últimas décadas. A medida que la eficiencia espacial de sus distintas maquinarias fue incrementando, las limitaciones asociadas a la infraestructura de los centros de datos pasaron a un segundo plano y, en su lugar, creció la justificada preocupación por el consumo energético.

Este último punto puede pasar desapercibido si se compara con otros aspectos, tales como la capacidad de procesamiento o el almacenamiento de datos; sin embargo, los centros de datos son responsables de consumir aproximadamente el 1,3 % de la energía total en todo el mundo. Por este motivo, muchos proveedores de centros de datos han adoptado nuevas estrategias, estándares y/o certificaciones (ISO, Uptime Institute, ASHRAE) con el objetivo de optimizar el uso de la energía y mejorar su imagen corporativa (Díaz et al., 2017). A pesar de ello, el principal problema que enfrentan los centros de datos no está tan ligado al consumo de energía como si lo está al aprovechamiento real de esta última (exergía).



Sintetizado de forma breve, la energía eléctrica consumida por los equipos informáticos termina transformándose casi en su totalidad en calor no aprovechable dentro de estas instalaciones. En consecuencia, el calor producido debe ser extraído continuamente para mantener condiciones operativas adecuadas y garantizar la estabilidad y eficiencia del sistema. Como resultado, casi el 40 % del consumo total de energía de un centro de datos corresponde únicamente al sistema de enfriamiento (Díaz et al., 2017) . Adicionalmente, como requisito de operatividad las mejores prácticas sugieren operar los servidores alrededor de los 22 °C, mientras que las nuevas tecnologías continúan aumentando sus requerimientos de disipación de calor, alcanzando decenas de kW por rack. Esta situación puede derivar eventualmente en problemas asociados tanto al elevado consumo energético como al incremento sostenido de la temperatura.

Aunque este aumento de temperatura pueda parecer un efecto secundario menor, en realidad constituye uno de los principales limitantes del rendimiento, la confiabilidad, la vida útil y el costo operativo de los centros de datos. Como consecuencia, una fracción considerable de la energía destinada a su funcionamiento no se emplea directamente en el procesamiento de información o en actividades de cómputo, sino en alimentar los sistemas de enfriamiento necesarios para disipar el calor residual generado por la propia actividad computacional.

Frente a esta problemática, nuestro trabajo de investigación busca analizar el fenómeno de la disipación de calor en centros de datos desde un enfoque termodinámico, con énfasis en la eficiencia exergética de los sistemas de refrigeración. En este sentido, se emplea el análisis exergético, entendido como una herramienta que permite cuantificar el máximo trabajo útil que

puede obtenerse de una forma de energía bajo condiciones determinadas, con el fin de identificar irreversibilidades y fuentes de ineficiencia dentro del sistema.

## 2. Motivación y metas

Analizar termodinámicamente la disipación de calor y eficiencia exergética de los sistemas de refrigeración utilizados en los centro de datos, evaluando las irreversibilidades y el desempeño energético del proceso de enfriamiento.

Los objetivos específicos del artículo son los siguientes:

- Describir el funcionamiento de un sistema de refrigeración
- Evaluar la transferencia de calor generada por los centros de datos

## 3. Fundamentos termodinámicos

### 3.1 Sistemas termodinámicos



Previo a la aplicación de cualquier método para cuantificar el calor disipado y la eficiencia exergética. Es necesario determinar el tipo de sistema termodinámico con el que nos enfrentamos. Un sistema termodinámico se define como una cantidad de materia o una región en el espacio elegida para ser analizada. La masa o región fuera del sistema se conocerá como los alrededores (Çengel et al., 2019).

En cuanto a los tipos de sistemas termodinámicos que existen, tenemos a los sistemas considerados cerrados o abiertos, dependiendo de si se elige para estudio una masa fija o un volumen fijo en el espacio. Si además de la restricción de masa se impide que la energía cruce la frontera de nuestro sistema, entonces se dé un sistema aislado.

### 3.2 Energía

Según Çengel et al. (2019) la energía es la capacidad que tiene un cuerpo de realizar trabajo o de transformar o calentar una sustancia. La energía puede existir en varias formas: térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química o nuclear. A la suma de todas las formas de energía presentes en un sistema se les denomina energía total (E). De acuerdo con la primera ley de la termodinámica, la energía no puede crearse ni destruirse; únicamente puede transformarse de una forma a otra. Como consecuencia, la energía total de un sistema aislado permanece constante. Por ejemplo, cuando una roca cae, su energía potencial gravitatoria disminuye mientras que su energía cinética aumenta. La energía no desaparece.

### 3.3 Exergía

Respecto a la exergía, Jarauta Rovira y Morata Cariñena (2013) señalan que se refiere a la máxima cantidad de energía que teóricamente puede convertirse en un trabajo útil cuando un sistema evoluciona de manera reversible desde un estado arbitrario hasta alcanzar el equilibrio con su entorno. La porción de energía que no puede transformarse en trabajo útil se denomina anergía, y ambas constituyen conjuntamente la energía total de un sistema que ya se mencionó anteriormente. De esta manera, la exergía puede entenderse como un parámetro unificado para evaluar tanto la cantidad como la calidad de la energía en un proceso.

Un ejemplo típico para comprender el concepto de exergía es el flujo de agua proveniente de una cascada situada a 100 m de altura y empleada para mover las turbinas de una central hidroeléctrica. Debido a su posición elevada, el agua posee energía potencial que puede transformarse en trabajo útil al mover las turbinas. En este caso, gran parte de dicha energía representa exergía, ya que puede aprovecharse para generar electricidad. Una vez que el agua alcanza el río situado aguas abajo, continúa poseyendo energía interna y energía cinética; sin embargo, su capacidad para producir trabajo útil se reduce considerablemente luego de la caída.

### 3.4 Segunda ley de la termodinámica

La segunda ley de la termodinámica complementa a la primera ley al proporcionar criterios para determinar la dirección natural de los procesos y evaluar la calidad de la energía. Mientras que la primera ley se ocupa de la conservación y transformación de la energía sin considerar su calidad, la segunda ley permite analizar el grado de aprovechamiento de esta y cuantificar su degradación durante los procesos reales (Çengel et al., 2019).. Asimismo, establece los límites teóricos de desempeño de dispositivos como máquinas térmicas y refrigeradores, constituyendo una herramienta fundamental para la evaluación de sistemas energéticos.

De la segunda ley de la termodinámica se desprenden dos enunciados fundamentales: el de Kelvin-Planck, que establece que no es posible convertir íntegramente el calor absorbido en trabajo útil, y el de Clausius, según el cual no es posible transferir calor de un cuerpo frío a otro más caliente sin realizar trabajo externo.



## 4. Descripción y modelado del sistema

### 4.1. Funcionamiento del sistema de refrigeración

En el presente trabajo se analizan tres tipos de sistemas de refrigeración para centros de datos: el sistema **DX in-row** (expansión directa), el sistema **CW in-row** (agua enfriada o chilled-water) y el sistema **CRAH** (Computer Room Air Handler) con chiller central y torre de enfriamiento. Cada uno responde a una arquitectura diferente de ciclo termodinámico y presenta un perfil característico de consumo y destrucción de exergía, según los regímenes de carga y las condiciones ambientales.

#### 4.1.1. Sistema Dx in- row o refrigeración directa

El sistema DX in-row es una unidad industrial de 30 kW que opera mediante un ciclo de compresión de vapor directa. A diferencia de los sistemas de agua enfriada, el refrigerante absorbe calor directamente en la unidad ubicada dentro de la sala de servidores. Según Baghsheikhi et al. (2025), este sistema consta de cuatro componentes principales, descritos a continuación en el orden del ciclo termodinámico (Çengel & Boles, 2015):

- Evaporador
- Compresor
- Condensador
- Válvula de expansión

El funcionamiento del ciclo DX sigue la siguiente secuencia: (1) el evaporador — una bobina de tres filas de tubos de cobre con aletas de aluminio — absorbe calor del aire caliente del pasillo, evaporando el refrigerante R410a hasta convertirlo en vapor sobrecalentado ($T_s$= 16.05 °C, $P_1$ = 9.63 bar); (2) el compresor rotativo tipo DA550 eleva la presión del refrigerante hasta 30.67 bar, incrementando su temperatura a 82.87 °C; (3) el condensador exterior — una bobina de cuatro filas — rechaza el calor hacia el ambiente, enfriando el refrigerante hasta líquido subenfriado (T = 45.62 °C); y (4) la válvula de expansión electrónica de 450 pasos reduce bruscamente la presión en un proceso isenfálpico, siendo el componente con menor destrucción de exergía del ciclo (15.34 % del total). Cinco ventiladores axiales (240 W c/u, 5800 rpm) extraen el aire caliente del pasillo y lo reinyectan enfriado al pasillo frío. En las pruebas experimentales reportadas por Baghsheikhi et al. (2025), el sistema alcanzó una capacidad de enfriamiento de 30.03 kW con un COP de 3.10 y una eficiencia exergética de 14.79 %. La Figura 1 muestra la unidad DX in-row de 30 kW estudiada y su circuito interno.

**Figura N°1:** Unidad DX in-row de 30 kW (a) y su circuito interno de refrigeración (b). El sistema emplea refrigerante R410a y cuenta con compresor rotativo, condensador exterior de cuatro filas y válvula de expansión electrónica.



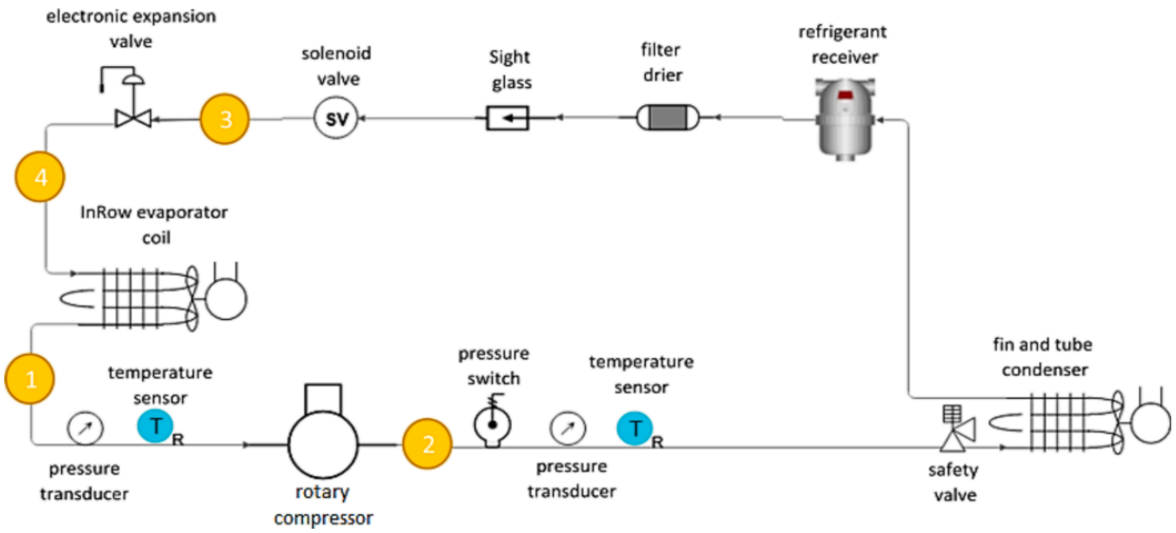



**Fig. 2.** A schematic of the refrigeration circuit.

**Fuente:** Baghsheikhi et al. (2025)

**Tabla N°1:** Validacion de los resultados del sistema DX in-row usando los modelos del resultado.

Validation of the 30-kW DX in-row system model using the test results.

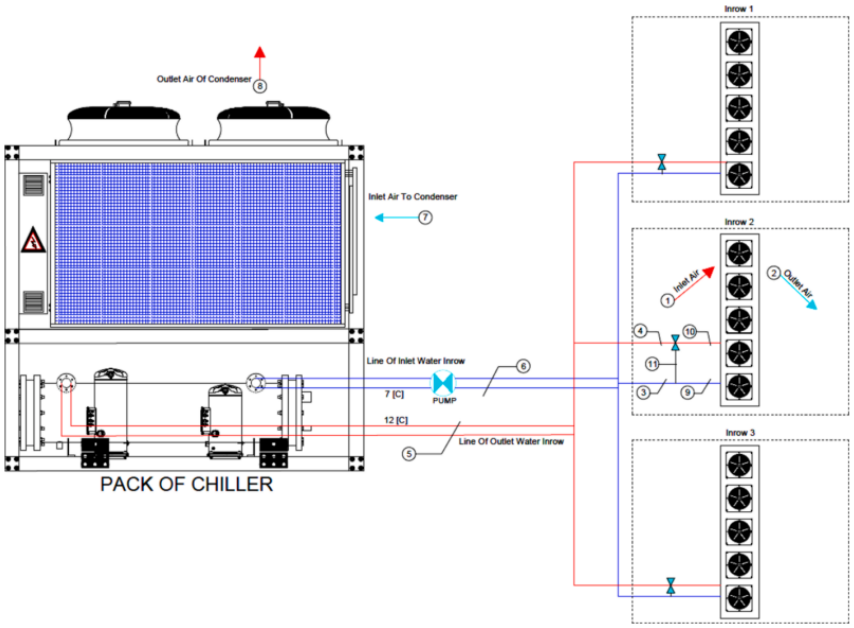
| Components | Experimental results (Kw) | EES Model results (Kw) | Error (%) |
|---|---|---|---|
| Cooling Capacity of DX In-row | 31.30 | 30.03 | 4.15 |
| Compressor Consumed Power | 8.19 | 7.80 | 4.76 |
| COP | 3.18 | 3.10 | 2.51 |

**Fuente:** Baghsheikhi et al. (2025)

### 4.1.2. Sistema CW (Chilled water - in row System) o Agua enfriada

El sistema CW in-row es una unidad industrial de 30 kW que no contiene un ciclo de refrigeración propio; en cambio, opera con agua enfriada suministrada externamente por un chiller de compresión de vapor (Baghsheikhi et al., 2025). El agua proveniente del chiller a 7 °C ingresa a la unidad a través de la conexión 4 y circula por una bobina de enfriamiento de cuatro filas de tubos de cobre con aletas de aluminio. Una válvula de control de tres vías (DN20, PN16) regula el caudal admitido comparando las temperaturas de entrada y salida del aire y del agua, optimizando la respuesta a la demanda térmica. Cinco ventiladores axiales (240 W c/u, 5800 rpm) hacen circular el aire caliente del pasillo sobre la bobina y reinyectan el aire enfriado al pasillo frío. El chiller externo, de 30 toneladas de refrigeración, cuenta con dos compresores scroll (Copeland ZR190KCE-TFD y ZR250KCE-TFD) y utiliza refrigerante R407c. Este chiller es responsable del 74 % de la destrucción total de exergía del sistema (ratío de exergía del chiller = 74.04 %), debido a las grandes diferencias de temperatura en el condensador y al comportamiento on-off del compresor (Baghsheikhi et al., 2025). Para garantizar suministro isotérmico estable en configuraciones de laboratorio, el circuito incluye un tanque de acumulación de 10,000 litros. En comparación con el sistema DX, el CW in-row presentó una eficiencia exergética de 12.39 % y un COP de 3.07 bajo las mismas condiciones de carga. Las Figuras 3 y 4 ilustran la unidad CW in-row y el esquema del ciclo de agua enfriada en la sala de prueba.

**Figura N°2:** Unidad CW in-row de 30 kW utilizada en el estudio. La unidad contiene una bobina de cuatro filas, cinco ventiladores axiales y una válvula de tres vías para el control de caudal de agua.






**Fuente:** Baghsheikhi et al. (2025)

**Tabla N°2:** Validacion de los resultados del sistema chilled-water in-row usando los modelos del resultado.

Validation of the chilled-water in-row system model using the test results.

| Components | Experimental Results (kW) | EES Model Results (kW) | Error (%) |
|---|---|---|---|
| Chiller Capacity | 102 | 97.71 | 4.20 |
| Chiller Consumed Power | 31.58 | 29.88 | 5.70 |
| Chilled-Water InRow Capacity | 31.30 | 29.80 | 4.79 |

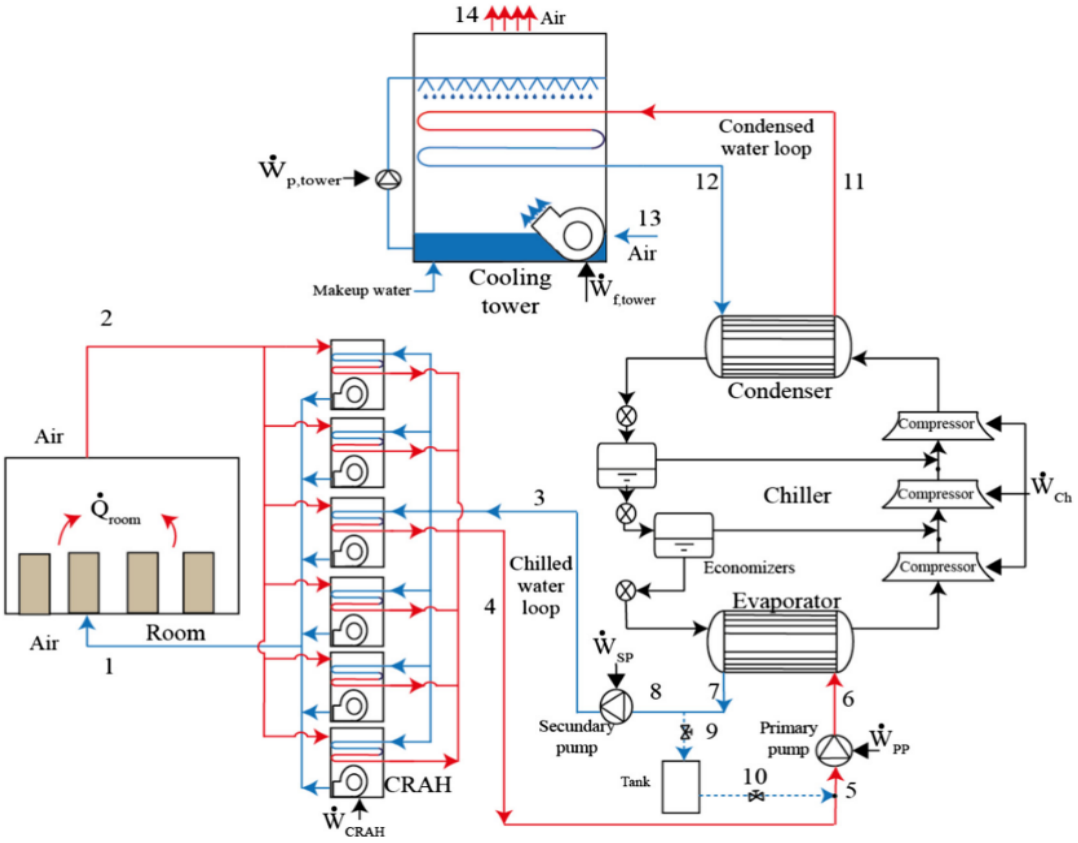
**Fuente:** Baghsheikhi et al. (2025)

### 4.1.3. Sistema CRAH (Computer Room Air Handle)

El sistema CRAH (Computer Room Air Handler) es la unidad central de manejo de aire en los sistemas de refrigeración perimetral de centros de datos. A diferencia del CRAC (Computer Room Air Conditioner), el CRAH no contiene un ciclo de refrigeración propio; en cambio, utiliza agua fría suministrada por un chiller central como fluido de enfriamiento (Díaz et al., 2017). Este sistema forma parte de una cadena térmica más extensa que incluye también el chiller y una torre de enfriamiento. La Figura 5 muestra el esquema de la sala del centro de datos con el sistema CRAH, identificando el piso elevado (1), el pasillo frío (2), el pasillo caliente (3), los racks (4) y el retorno de aire caliente (5).

El principio de operación es el siguiente: el CRAH toma el aire caliente de retorno de la sala de servidores ($T_2$ variable según recirculación) y lo hace pasar por una batería de tubos de agua fría a $T_7 = 6$ °C (Díaz et al., 2017). El calor es transferido al agua, y el aire resultante, enfriado a $T_1 \approx 20$ °C, se inyecta al piso elevado y se distribuye por las losetas perforadas hacia el pasillo frío, donde ingresa a cada rack. Según los parámetros operativos reportados por Díaz et al. (2017), cada CRAH tiene una capacidad máxima de disipación de $Q_{haE} = 118.6$ kW, un caudal de aire máximo de 8.33 m³/s y un caudal de agua máximo de 0.00473 m³/s. La Tabla 1 presenta los parámetros operativos completos del sistema. El sistema puede emplear de 1 a 6 unidades CRAH en función de la carga térmica, activándose unidades adicionales cuando una unidad alcanza su límite de capacidad o caudal de aire.

**Figura N°3:** Esquema de la sala del centro de datos con sistema de refrigeración perimetral CRAH. Se identifican: (1) piso elevado con losetas perforadas, (2) pasillo frío donde ingresa el aire enfriado a ≈20 °C, (3) pasillo caliente con retorno a ≈32 °C, (4) racks de servidores y (5) retorno de aire caliente al CRAH. Las flechas rojas indican recirculación no deseada de aire caliente, principal fuente de irreversibilidad del sistema.




**Fuente:** Díaz et al. (2017)

**Tabla N°3:**Parametros operativos del sistema de refrigeración.

Refrigeration system operating parameters.

| Parameter | Value |
|---|---|
| Number of racks | 1–42 |
| Rack load density (kW) | 2; 5; 10; 15 |
| Air flow per rack ($m^3/s$) | 0.3 |
| Processor temperature (°C) | 65 |
| CRAH, heat flow dissipation capacity (kW) | 118.6 |
| CRAH, fan nominal power consumption (kW) | 5.44 |
| CRAH, water temperature variation, $T_4$-$T_3$ (°C) | 6 |
| CRAH, power consumption associated to controllers and monitoring systems (kW) | 3.26 |
| CRAH, water line pressure drop (bar) | 0.758 |
| CRAH, maximum air flow rate ($m^3/s$) | 8.33 |
| CRAH, maximum water flow rate ($m^3/s$) | 0.00473 |
| Chilled water loop pressure, $P_3$ (bar) | 3 |
| Chiller, minimum water flow rate through the evaporator ($m^3/s$) | 0.035 |
| Chiller, cooling capacity (ton) | 300 |
| Chiller, minimum water flow rate through the condenser ($m^3/s$) | 0.056 |
| Cooling tower, fan power consumption (kW) | 15 |
| Cooling tower, fan nominal speed (RPM) | 462 |
| Cooling tower, fan diameter (mm) | 660 |
| Cooling tower, pump power consumption (kW) | 5 |
| Primary pump nominal power consumption (kW) | 15 |
| Secondary pump nominal power consumption (kW) | 30 |
| Isentropic efficiency of primary and secondary pumps (%) | 80.2 |



**Fuente:** Díaz et al. (2017)

### 4.1.4. Chiller y torre de enfriamiento

El chiller es la unidad de refrigeración central que produce el agua fría (chilled water) suministrada a las unidades CRAH. Opera mediante un ciclo de compresión de vapor de múltiples etapas, rechazando el calor absorbido hacia la torre de enfriamiento. Conforme a Çengel & Boles (2015), el ciclo de compresión de vapor constituye el método de refrigeración dominante en aplicaciones industriales, dado que permite mover calor desde una fuente fría hacia un sumidero caliente mediante el aporte de trabajo mecánico al compresor.

En el sistema estudiado por Díaz et al. (2017) se emplea un chiller Trane CVHE con refrigerante R-123, dos economizadores y tres etapas de compresión, con una capacidad nominal de $Q_n$ = 1,055.06 kW. Los economizadores permiten sub-enfriar el refrigerante entre etapas de compresión, reduciendo el trabajo total del compresor respecto a un ciclo simple. La torre de enfriamiento (modelo Marley MCF7055), por su parte, rechaza el calor del chiller al ambiente exterior mediante evaporación: dos ventiladores de 15 kW cada uno y una bomba de 5 kW mantienen el flujo de agua y aire necesarios para suministrar agua a $T_{12}$ = 25 °C al condensador del chiller. La Figura 6 muestra el esquema completo del sistema de refrigeración con el chiller, la torre y las unidades CRAH.

**Tabla N°4:** Comparasion de consumo de exergia y exergonomia entre los sistemas Chilled y Dx

Comparison of exergy and exergoeconomic analyses for two cooling technologies in a 90 kW data center.

| Type of system | Exergy efficiency | Relative cost difference | Exergoeconomic factor |
|---|---|---|---|
| Direct expansion InRow | 14.79 % | 6.20 | 22.17 % |
| Chilled-water InRow | 12.4 % | 7.45 | 49.42 % |

**Fuente:** Díaz et al. (2017)

### 4.2. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor: Base termodinámica común

Los tres sistemas descritos (DX in-row, CW in-row y CRAH-chiller) comparten un principio común: el ciclo de compresión de vapor. Según Çengel & Boles (2015), este ciclo es el más ampliamente utilizado en aplicaciones de refrigeración y aire acondicionado porque permite transferir calor desde una fuente fría (los servidores) hacia el ambiente exterior mediante el aporte de trabajo eléctrico al compresor. El ciclo ideal (Figura 7) consta de cuatro procesos fundamentales, que en un diagrama presión-entalposa (P-h) se representan como:



- Proceso 1-2 — Compresión isentrópica: El refrigerante en estado de vapor saturado (o vapor sobrecalentado) ingresa al compresor y es comprimido adiabáticamente hasta la presión de condensación, incrementando su temperatura.
- Proceso 2-3 — Condensación a presión constante: El refrigerante sobrecalentado cede calor al medio de alta temperatura (agua de la torre o aire exterior) hasta convertirse en líquido saturado o subenfriado.
- Proceso 3-4 — Expansión en válvula de estrangulamiento: El líquido a alta presión pasa por la válvula de expansión, donde su presión y temperatura disminuyen bruscamente en un proceso isentálpico irreversible.
- Proceso 4-1 — Evaporación a presión constante: El refrigerante en estado de mezcla líquido-vapor absorbe calor del espacio refrigerado (el centro de datos), evaporándose completamente y completando el ciclo.

La segunda ley de la termodinámica establece que el calor no fluye espontáneamente desde una temperatura baja hacia una alta. Para lograr este proceso inverso — que es exactamente lo que hacen los sistemas de refrigeración de centros de datos — es necesario suministrar trabajo externo al ciclo. Este trabajo es realizado por el compresor, que eleva la presión y temperatura del refrigerante para que pueda rechazar calor hacia el ambiente exterior (Çengel & Boles, 2015). En los centros de datos, el "espacio refrigerado" es la sala de servidores, y el calor rechazado es el que se disipa finalmente en la torre de enfriamiento o el condensador exterior.

### 4.3. Coeficiente de Desempeño (COP) del sistema

El desempeño de los sistemas de refrigeración se mide con el Coeficiente de Desempeño (COP), definido según Çengel & Boles (2015) como la razón entre el efecto de enfriamiento obtenido y el trabajo neto consumido. Para el sistema completo del centro de datos, Díaz et al. (2017) extienden esta definición considerando todos los equipos del ciclo (Ecuación 1 de la Figura 7)*:*

$$\mathrm{COP_R} = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{\text{Efecto de enfriamiento}}{\text{Entrada de trabajo}} = \frac{Q_L}{W_{\text{neto,entrada}}}$$

$$\mathrm{COP_{BC}} = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{\text{Efecto de calentamiento}}{\text{Entrada de trabajo}} = \frac{Q_H}{W_{\text{neto,entrada}}}$$

$$\mathrm{COP_{BC}} = \mathrm{COP_R} + 1$$

Sin embargo, como se analizará en la Sección 6, el COP puede resultar engañoso: Díaz et al. (2017) demostraron que el COP aumenta con la recirculación de aire caliente — una condición que termodinámicamente empeora el sistema — porque el calor removido aumenta más rápidamente que el trabajo consumido. Por esta razón, el análisis de segunda ley (eficiencia exergética) es necesario para complementar el COP.



$$\mathrm{COP_{R,Carnot}} = \frac{1}{T_H/T_L - 1}$$

$$\mathrm{COP_{BC,Carnot}} = \frac{1}{1 - T_L/T_H}$$

## 5. Número de estantes y efecto de mezcla de aire

### 5.1. El efecto del número de bastidores activos

La cantidad de bastidores activos altera la relación entre carga térmica real y capacidad instalada. Cuando el centro de datos opera con baja ocupación, las unidades de enfriamiento pueden mantenerse activas por encima de la demanda efectiva, lo que incrementa el consumo auxiliar y la destrucción relativa de exergía. Por el contrario, a mayor ocupación la carga térmica total aumenta y el sistema se acerca a su punto de diseño, aunque también se incrementa la exigencia sobre el chiller.

Díaz et al. (2017) reportaron que una menor cantidad de racks activos incrementa la destrucción de exergía debido al uso excesivo de potencia en condiciones de baja demanda. Asimismo, observaron que el chiller domina el consumo cuando los racks son de alta densidad, mientras que en cargas bajas la torre de enfriamiento puede adquirir mayor participación energética.

Este comportamiento demuestra que el diseño del sistema debe ser modular y variable. En términos prácticos, no basta con instalar una capacidad de enfriamiento elevada; también se requiere que ventiladores, bombas, compresores y torres respondan proporcionalmente a la car-

ga real. De lo contrario, el sistema mantiene la temperatura, pero lo hace con una penalización termodinámica innecesaria.

### 5.2. Efecto de la carga térmica por rack

La carga térmica por rack determina el flujo de calor que debe ser extraído desde la zona de servidores hacia el sistema de refrigeración. Cuando la carga aumenta, se requiere mayor caudal de aire o agua, mayor capacidad de intercambio y mayor trabajo de compresión. Por esta razón, los racks de alta densidad trasladan el punto crítico del sistema hacia el chiller y el condensador.

En cargas bajas, la ineficiencia puede originarse por sobredimensionamiento de equipos auxiliares; en cargas altas, en cambio, el consumo se concentra principalmente en el ciclo de refrigeración. La Figura 3 resume esta tendencia de forma conceptual para facilitar la discusión del comportamiento energético.

### 5.3. Efecto de la mezcla de aire caliente y frío

La recirculación se produce cuando el aire caliente descargado por los servidores retorna hacia la admisión de los racks, mezclándose con el aire frío suministrado. Aunque esta situación puede parecer un problema de distribución de flujo, desde la segunda ley implica generación de entropía y destrucción de exergía, debido a la mezcla irreversible de corrientes a diferentes temperaturas.



Silva-Llanca et al. (2019) evaluaron estrategias de suministro de aire mediante generación de entropía y mostraron que la configuración del flujo influye en la efectividad del enfriamiento. Por su parte, Gupta et al. (2020) indicaron que el espacio de aire puede representar una fracción relevante de la pérdida exergética total en arquitecturas de enfriamiento por aire, especialmente cuando existen mezcla térmica y pérdidas de presión.

Por ello, la contención de pasillos, el sellado de aberturas, la correcta ubicación de baldosas perforadas y el ajuste de caudales son medidas que no solo reducen puntos calientes, sino que también disminuyen la generación de entropía en la sala. En consecuencia, mejoran la eficiencia de segunda ley del proceso de disipación de calor.

## 6.Análisis exergético y evaluación del desempeño termodinámico de los sistemas de refrigeración

### 6.1. Fundamentos del análisis exergético

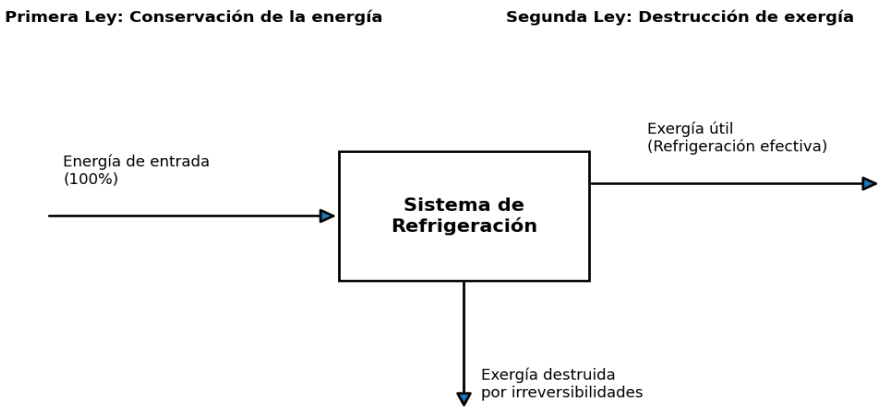
El análisis del desempeño de los sistemas de refrigeración suele realizarse mediante indicadores energéticos tradicionales, como el Coeficiente de Rendimiento (COP), que relaciona la capacidad de enfriamiento obtenida con la energía consumida por el sistema. No obstante, este enfoque se basa principalmente en la Primera ley de la termodinámica, la cual establece la conservación de la energía, pero no proporciona información acerca de la calidad de dicha energía ni sobre las pérdidas ocasionadas por las irreversibilidades presentes en los procesos reales. Por esta razón, en las últimas décadas ha cobrado especial relevancia el análisis exergético como herramienta complementaria para la evaluación del desempeño termodinámico de sistemas térmicos y de refrigeración.

La exergía puede definirse como el máximo trabajo útil que puede obtenerse de un sistema cuando este alcanza el equilibrio con un entorno de referencia. En palabras de Dincer y Çengel (2001), "Exergy is defined as the maximum amount of work which can be produced by a system or a flow of matter or energy as it comes to equilibrium with a reference environment". Esta definición resalta que la exergía no solo considera la cantidad de energía disponible, sino también su capacidad real para transformarse en trabajo útil.

Una de las principales diferencias entre los conceptos de energía y exergía radica en su comportamiento durante los procesos termodinámicos. Mientras que la energía se conserva de acuerdo con la Primera ley de la termodinámica, la exergía disminuye debido a las irreversibilidades presentes en los procesos reales. Como se muestra en la Figura 6, parte de la energía suministrada al sistema puede aprovecharse para producir un efecto útil de refrigeración, mientras que otra parte de su potencial de trabajo se destruye como consecuencia de la generación de entropía y otros fenómenos irreversibles.

**Figura N°6:** Representación conceptual del flujo de energía y destrucción de exergía en un sistema de refrigeración. Se muestra la energía suministrada al sistema, la fracción aprovechada como exergía útil para el proceso de refrigeración y la exergía destruida debido a irreversibilidades asociadas a la transferencia de calor, la fricción y otros procesos reales. El esquema ilustra la diferencia fundamental entre la conservación de la energía establecida por la Primera ley de la termodinámica y la degradación de la exergía explicada por la Segunda ley.






**Fuente:** Elaboración propia con base en Dincer y Çengel (2001)

La importancia de la Segunda ley de la termodinámica dentro del análisis exergético radica precisamente en que permite evaluar la calidad de la energía y cuantificar las pérdidas asociadas a fenómenos irreversibles. Mientras que un análisis energético convencional puede indicar que la energía se conserva dentro de un sistema, no es capaz de determinar qué fracción de dicha energía se encuentra realmente disponible para producir trabajo útil. Por ello, el análisis exergético proporciona una visión más completa del desempeño termodinámico, permitiendo identificar oportunidades de mejora y optimización.

En sistemas de refrigeración, esta diferencia resulta especialmente relevante debido a que diversos componentes operan bajo condiciones alejadas del equilibrio termodinámico. Procesos

como la compresión, la transferencia de calor y la circulación de fluidos generan pérdidas que no pueden ser identificadas únicamente mediante balances energéticos. Como consecuencia, dos sistemas pueden presentar consumos energéticos similares, pero desempeños termodinámicos distintos cuando se consideran las irreversibilidades presentes en cada uno de ellos.

La literatura reciente sobre refrigeración en centros de datos respalda esta necesidad de complementar los análisis energéticos con enfoques basados en la Segunda ley de la termodinámica. Díaz et al. (2017) señalan que indicadores como el COP pueden resultar insuficientes para evaluar adecuadamente el comportamiento de los sistemas de enfriamiento, ya que no reflejan el impacto de las irreversibilidades internas ni de la destrucción de exergía. Por ello, los autores recomiendan incorporar la eficiencia de segunda ley como criterio adicional para obtener una evaluación más realista del desempeño térmico.

En consecuencia, el análisis exergético constituye una herramienta fundamental para comprender el funcionamiento de los sistemas de refrigeración modernos. Su aplicación permite trascender el simple balance de energía y centrarse en la calidad de los recursos energéticos utilizados, proporcionando una base más sólida para la identificación de ineficiencias y la mejora continua de los sistemas de enfriamiento en centros de datos.



### 6.2. Destrucción de exergía e irreversibilidades en sistemas de refrigeración

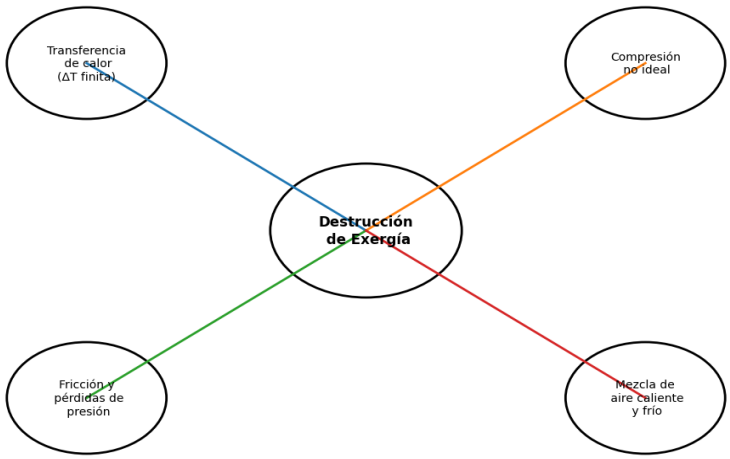
La destrucción de exergía constituye uno de los conceptos centrales del análisis exergético, ya que representa la pérdida de capacidad para producir trabajo útil como consecuencia de las irreversibilidades presentes en los procesos reales. A diferencia de la energía, que se conserva de acuerdo con la Primera ley de la termodinámica, la exergía puede degradarse o destruirse debido a fenómenos que alejan al sistema de un comportamiento ideal. Por ello, la destrucción de exergía se considera una medida directa de la ineficiencia termodinámica de un sistema.

Según Dincer y Çengel (2001), en los sistemas reales la exergía siempre es destruida parcial o totalmente debido a la presencia de irreversibilidades. Este planteamiento convierte a la destrucción de exergía en un indicador particularmente útil para localizar las fuentes de pérdida de desempeño y cuantificar su impacto sobre la eficiencia global del sistema.

La destrucción de exergía se encuentra estrechamente relacionada con la generación de entropía, concepto fundamental de la Segunda ley de la termodinámica. Cuando un proceso genera entropía, parte del potencial energético disponible deja de ser aprovechable para producir trabajo útil. En consecuencia, un aumento de la generación de entropía implica un incremento de la destrucción de exergía y, por tanto, una reducción de la eficiencia termodinámica. Esta relación permite utilizar el análisis exergético como una herramienta para identificar los procesos responsables de la mayor degradación energética dentro de un sistema.

Diversos estudios han demostrado que las principales irreversibilidades en los sistemas de refrigeración se originan en procesos de transferencia de calor, compresión y transporte de fluidos. Bejan (2002) señala que la transferencia de calor con diferencias finitas de temperatura constituye una de las fuentes más importantes de destrucción de exergía. Asimismo, estas pérdidas termodinámicas pueden originarse por compresión no ideal, fricción, pérdidas de presión y mezcla de corrientes de aire. Como se muestra en la Figura 7, estas fuentes de irreversibilidad son responsables de la degradación de la energía útil disponible y, en consecuencia, de la disminución de la eficiencia exergética del sistema.

**Figura N°7:** Principales fuentes de irreversibilidad responsables de la destrucción de exergía en sistemas de refrigeración. Se identifican: (1) transferencia de calor con diferencia finita de temperatura, (2) compresión no ideal del refrigerante, (3) fricción y pérdidas de presión durante el flujo de fluidos y (4) mezcla de corrientes de aire caliente y frío. Estos fenómenos incrementan la generación de entropía y reducen la capacidad del sistema para producir trabajo útil, provocando una disminución de la eficiencia exergética.




**Fuente:** Elaboración propia con base en Bejan (2002)

Otra fuente importante de irreversibilidades corresponde a la compresión no ideal del refrigerante. En condiciones reales, los compresores presentan pérdidas mecánicas, eléctricas y termodinámicas que incrementan el consumo energético y reducen el aprovechamiento del trabajo suministrado. Estas pérdidas se traducen en una mayor destrucción de exergía y afectan directamente el desempeño global del ciclo de refrigeración.

Asimismo, la fricción interna y las pérdidas de presión que ocurren durante el transporte del refrigerante o del aire de enfriamiento generan degradación energética adicional. De acuerdo con Bejan (2002), los fenómenos asociados al flujo de fluidos representan mecanismos importantes de generación de entropía, especialmente cuando existen cambios bruscos de dirección, restricciones geométricas o velocidades elevadas. Estas condiciones provocan pérdidas de carga que incrementan la destrucción de exergía dentro del sistema.

En el contexto de los centros de datos, una fuente adicional de irreversibilidades corresponde a la mezcla de corrientes de aire caliente y aire frío. Cuando el aire caliente expulsado por los servidores se mezcla con el aire frío suministrado por los sistemas de refrigeración, se incrementa la generación de entropía y se reduce la calidad de la energía utilizada para el enfriamiento. Díaz et al. (2017) identificaron este fenómeno como una de las principales causas de destrucción de exergía en centros de datos, destacando que la recirculación de aire caliente deteriora el desempeño termodinámico del sistema incluso cuando algunos indicadores energéticos tradicionales sugieren mejoras aparentes.

Por lo tanto, el análisis de la destrucción de exergía permite identificar con mayor precisión los componentes y procesos responsables de las pérdidas termodinámicas. Esta capacidad de diagnóstico constituye una ventaja significativa frente a los métodos convencionales basados únicamente en balances energéticos, ya que facilita la implementación de estrategias orientadas

a reducir irreversibilidades, optimizar el uso de la energía y mejorar la eficiencia global de los sistemas de refrigeración. La Tabla 5 resume las principales fuentes de irreversibilidad identificadas en la literatura y sus efectos sobre el desempeño termodinámico de estos sistemas.

**Tabla N°5:** Principales fuentes de irreversibilidad y sus efectos termodinámicos en sistemas de refrigeración.

| Fuente de irreversibilidad | Consecuencia termodinámica |
|---|---|
| Transferencia de calor con ΔT finita | Incrementa la generación de entropía y destruye exergía |
| Compresión no ideal | Reduce la eficiencia real del compresor |
| Fricción y pérdidas de presión | Produce degradación energética durante el flujo |
| Mezcla de aire caliente y aire frío | Incrementa irreversibilidades y disminuye la calidad energética |

**Nota:** La destrucción de exergía constituye una medida directa de las ineficiencias termodinámicas generadas por procesos irreversibles.

**Fuente:** Adaptado de Bejan (2002) y complementado con los conceptos de análisis exergético descritos por Dincer y Çengel (2001).

### 6.3. Influencia de la mezcla de aire caliente y aire frío en el desempeño del sistema



#### 6.3.1 Mezcla de corrientes de aire en centros de datos

Como se describió en la Sección 4.1.3, el sistema CRAH suministra aire frío al pasillo frío para enfriar los servidores, mientras que el aire caliente resultante es expulsado hacia el pasillo caliente y posteriormente retorna al sistema de refrigeración. Idealmente, ambas corrientes deberían permanecer separadas; sin embargo, debido a diferencias de presión, fugas o diseños inadecuados de la sala, una fracción del aire caliente puede regresar al pasillo frío y mezclarse con el aire suministrado por el sistema de enfriamiento. Esta situación recibe el nombre de recirculación de aire caliente y constituye una de las principales fuentes de ineficiencia en los centros de datos.

#### 6.3.2 Efecto de la mezcla sobre la destrucción de exergía

$$\dot{E}x_{dest} = T_0 \dot{S}_{gen}$$

Desde el punto de vista energético, la energía total del aire permanece prácticamente constante durante la mezcla. Sin embargo, desde el punto de vista exergético, ocurre una disminución de la capacidad de la energía para transformarse en trabajo útil. Esto se debe a que la mezcla espontánea de corrientes a diferentes temperaturas genera entropía y aumenta las irreversibilidades del sistema. La relación entre destrucción de exergía y generación de entropía puede expresarse mediante la ecuación:

Esta ecuación muestra que toda generación de entropía implica una pérdida irreversible de exergía. Por ello, cuando aumenta la mezcla entre aire caliente y aire frío, también aumenta la destrucción de exergía dentro del sistema.

### 6.4. Evaluación del desempeño termodinámico mediante indicadores energéticos y exergéticos

Los sistemas de refrigeración analizados en la Sección 4 tienen la función de extraer el calor generado por los equipos informáticos y mantener condiciones térmicas adecuadas para su funcionamiento. Tradicionalmente, el desempeño de estos sistemas se evalúa mediante el Coeficiente de Desempeño (COP), un indicador energético que relaciona la capacidad de enfriamiento obtenida con la potencia consumida por el sistema.

Aunque el COP permite evaluar la eficiencia energética global del proceso de enfriamiento, este indicador se basa únicamente en la Primera ley de la termodinámica y no considera las pérdidas ocasionadas por las irreversibilidades presentes durante la operación del sistema. Por esta razón, resulta necesario complementar el análisis mediante la eficiencia exergética o eficiencia de segunda ley, la cual incorpora el efecto de la destrucción de exergía sobre el desempeño del sistema.



$$\eta_{II,system} = 1 - \frac{\dot{\chi}_{dest,system}}{\dot{\chi}_{in}} = 1 - \frac{\dot{\chi}_{dest,system}}{\dot{W}_{system} + n_{racks}\dot{Q}_{rack}\left(1 - \frac{T_0}{T_p}\right)}$$

Donde podemos observar a la exergía total añadida al sistema de refrigeración, la destrucción de exergía del sistema de refrigeración, el número de bastidores activos y la temperatura del procesador

La principal diferencia entre ambos indicadores radica en que el COP evalúa únicamente la cantidad de energía utilizada, mientras que la eficiencia exergética considera también la calidad de dicha energía y su capacidad para producir trabajo útil.

**Tabla N°6:** Desempeño energético y exergético de los sistemas analizados

| Sistema | COP | Eficiencia exergética (%) |
|---|---|---|
| DX In-Row | 3.10 | 14.79 |
| CW In-Row | 3.07 | 12.39 |

**Fuente:** Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 6.3, ambos sistemas presentan valores de COP muy similares, con una diferencia de apenas 0.03 unidades. Desde una perspectiva exclusivamente energética, podría concluirse que ambos sistemas poseen prácticamente el mismo desempeño. No obstante, el análisis exergético revela diferencias más significativas. El sistema DX In-Row alcanza una eficiencia exergética de 14.79 %, mientras que el sistema CW In-Row registra un valor de 12.39 %.

Estos resultados indican que el sistema DX In-Row aprovecha de manera más eficiente la energía disponible y presenta menores pérdidas asociadas a irreversibilidades. En otras palabras,

aunque ambos sistemas consuman cantidades similares de energía para producir refrigeración, no utilizan dicha energía con la misma efectividad desde el punto de vista termodinámico.

Además, tal como se analizó en la Sección 6.3, la mezcla entre aire caliente y aire frío genera un incremento de las irreversibilidades y de la destrucción de exergía dentro del centro de datos. En estas condiciones, el COP puede mantenerse relativamente constante o incluso mostrar ligeras mejoras, mientras que la eficiencia exergética disminuye debido al deterioro de la calidad energética del proceso. Por ello, la evaluación conjunta de ambos indicadores proporciona una visión más completa del desempeño de los sistemas de refrigeración y permite identificar oportunidades de mejora orientadas a reducir las pérdidas termodinámicas y optimizar la operación de los centros de datos.

## 7. Energía y comsumo energético total del centro de datos

### 7.1. Por qué el chiller consume tanto

El chiller consume una proporción importante de energía porque opera mediante un ciclo de compresión de vapor. El compresor debe elevar la presión y la temperatura del refrigerante para que el calor absorbido en el evaporador pueda rechazarse posteriormente en el condensador. Por ello, cuanto menor sea la temperatura de evaporación o mayor sea la temperatura de condensación, mayor será el trabajo requerido por el compresor y menor será el coeficiente de rendimiento del sistema (Çengel & Boles, 2019).



Desde el enfoque exergético, el consumo del chiller aumenta cuando el sistema trabaja con diferencias de temperatura innecesariamente grandes. Esto puede ocurrir, por ejemplo, cuando se suministra aire o agua más fría de lo necesario para compensar una mala distribución del aire, recirculación o puntos calientes. En consecuencia, una adecuada gestión del flujo de aire permite reducir indirectamente el trabajo de compresión y las irreversibilidades del sistema de refrigeración (Díaz et al., 2017).

Van Geet y Sickinger (2024) recomiendan elevar la temperatura de entrada del aire a los equipos informáticos dentro de los límites seguros, controlar la velocidad de ventiladores y bombas de acuerdo con la carga térmica, y emplear estrategias de free cooling o economización. Estas medidas reducen la necesidad de utilizar sistemas de refrigeración basados en compresores, como los chillers o sistemas de expansión directa.

### 7.2. Comparación entre DX cooling y chilled-water

Los sistemas DX cooling son soluciones de expansión directa en las que el refrigerante absorbe calor directamente en la unidad de enfriamiento. Su principal ventaja es la simplicidad de instalación, por lo que resultan frecuentes en salas pequeñas o medianas. Sin embargo, su flexibilidad puede ser limitada cuando la carga térmica crece o cuando se requieren estrategias avanzadas de economización.

Los sistemas chilled-water, en cambio, utilizan una planta central de agua helada, unidades CRAH, bombas, chillers y torres de enfriamiento. Aunque presentan mayor complejidad e inversión inicial, ofrecen mejor escalabilidad, mayor control a carga parcial y posibilidad de operar con temperaturas de agua más elevadas, lo que mejora la eficiencia del chiller y aumenta las horas disponibles de economización. (DOE/NREL, 2024).

## 8. Conclusiones

El análisis desarrollado permite concluir que el desempeño de los sistemas de refrigeración en centros de datos depende no solo de la capacidad instalada de los equipos, sino también de la forma en que estos se adaptan a las condiciones reales de operación y aprovechan los recursos brindados. La relación entre la carga térmica generada por los servidores, la estrategia de control implementada y la distribución del flujo de aire influye directamente en el consumo energético y en la eficiencia global del sistema. En escenarios de baja ocupación, los sistemas sobredimensionados pueden presentar mayores pérdidas relativas de exergía debido a un aprovechamiento insuficiente de los recursos disponibles. Por el contrario, cuando la densidad de carga térmica aumenta, el chiller adquiere un papel predominante dentro del consumo energético total de la instalación, convirtiéndose en uno de los principales focos de optimización (Díaz et al., 2017).

La mezcla entre corrientes de aire a diferentes temperaturas incrementa la generación de entropía y reduce la calidad energética del proceso de enfriamiento, obligando al sistema a operar con mayores caudales de aire o con temperaturas de suministro más bajas para mantener condiciones seguras en los equipos informáticos. Desde una perspectiva termodinámica, esto se traduce en una mayor destrucción de exergía y una reducción de la eficiencia de segunda ley. Por esta razón, estrategias como la contención de pasillos fríos y calientes, el sellado de espacios no utilizados y la adecuada gestión del flujo de aire representan medidas efectivas para disminuir pérdidas y mejorar el desempeño del sistema de refrigeración (Díaz et al., 2017; Van Geet & Sickinger, 2024).



Por otra parte, la incorporación del análisis exergético permite complementar la evaluación energética convencional, proporcionando una visión más completa de las ineficiencias presentes en los procesos de enfriamiento. Mientras indicadores como el COP permiten cuantificar el rendimiento energético del sistema, la eficiencia exergética brinda información sobre la calidad de la energía utilizada y el efecto de las irreversibilidades internas. Por ello, el empleo conjunto de ambos enfoques resulta fundamental para identificar oportunidades de mejora y orientar decisiones de diseño y operación mediante criterios termodinámicos más rigurosos (Díaz et al., 2017; Silva-Llanca et al., 2019).

Finalmente, se concluye que el sistema de refrigeración con chiller y agua helada representa la alternativa más conveniente para centros de datos de mediana y gran escala. Aunque los sistemas DX pueden ser adecuados para instalaciones pequeñas por su simplicidad, el chiller ofrece mayor capacidad de expansión, control centralizado y posibilidades de mejorar su desempeño mediante variadores de velocidad, temperaturas de suministro optimizadas y estrategias de economización. Por tanto, el chiller puede considerarse la mejor opción cuando se combina con una correcta gestión del flujo de aire y un control eficiente de bombas y ventiladores. (Van Geet & Sickinger, 2024).

**9. Literatura citada**

**Avelar, V., Azevedo, D., & French, A**. (2012). PUE: A comprehensive examination of the metric. The Green Grid. https://datacenters.lbl.gov/sites/default/files/WP49-PUE%20A%20Comprehensive%20Examination%20of%20the%20Metric_v6.pdf

**Baghsheikhi, M., & Mohammadi, M**. (2023). Experimental investigation of the vapor-compression cooling system in a data center: Energy and exergy analysis. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 148, 9079–9097. https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ese3.129

**Bejan, A.** (2002). Fundamentals of exergy analysis, entropy generation minimization, and the generation of flow architecture. International Journal of Energy Research, 26, 0–43. https://doi.org/10.1002/er.804

Çengel**, Y. A., & Boles, M. A.** (2015). Termodinámica: Un enfoque de ingeniería (8.ª ed.).

Çengel**, Y. A., Boles, M. A., & Kanoğlu, M.** (2019). *Thermodynamics: An engineering approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education.

**Díaz, A. J., Cáceres, R., Cardemil, J. M., & Silva-Llanca, L**. (2017). Energy and exergy assessment in a perimeter cooled data center: The value of second law efficiency. Applied Thermal Engineering, 124, 820–830.

**Díaz, A. J., Cáceres, R., Cardemil, J. M., & Silva-Llanca, L**. (2017). Energy and exergy assessment in a perimeter cooled data center: The value of second law efficiency. Applied Thermal Engineering, 124, 820–830. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.066

**Dincer, I., & Çengel, Y. A**. (2001). Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering. Entropy, **3(3), 116–149.** https://www.mdpi.com/1099-4300/3/3/116

**Susnjara, S., & Smalley, I. (s.f.).** *What is a data center?*_IBM_Think. https://www.ibm.com/es-es/think/topics/data-centers

CTS CAFE Para ciudadanos…

**REVISTA DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA**

FORMATO DE PRESENTACIÓN DE ARTÍCULO

Para todos aquellos investigadores científicos y al público en general que deseen publicar sus trabajos en esta su ***Revista de Investigación Multidisciplianria CTSCAFE*** y para la correcta revisión por parte de nuestro Comité Científico de los artículos que serán escogidos para la publicación, los archivos de su artículo deveran ser enviados por correo electrónico a los editores: **revistactscafe@ctscafe.pe**. Los trabajos pueden ser presentados en idioma castellano, inglés o francés siguiendo las siguientes indicaciones:



**Título del Articulo**: Español, Inglés, francés y portugués escrito en altas y bajas, con una longitud no mayor a 150 caracteres, incluidos espacios.

**Autor-autores**: Nombre y apellido del autor o los autores. Afiliación institucional de los autores, correo electrónico de cada uno de los autores, indicando la dirección postal del autor para correspondencia si es que tuviera.

**Resumen**: no mayor de 250 palabras en Español, Inglés, y Francés

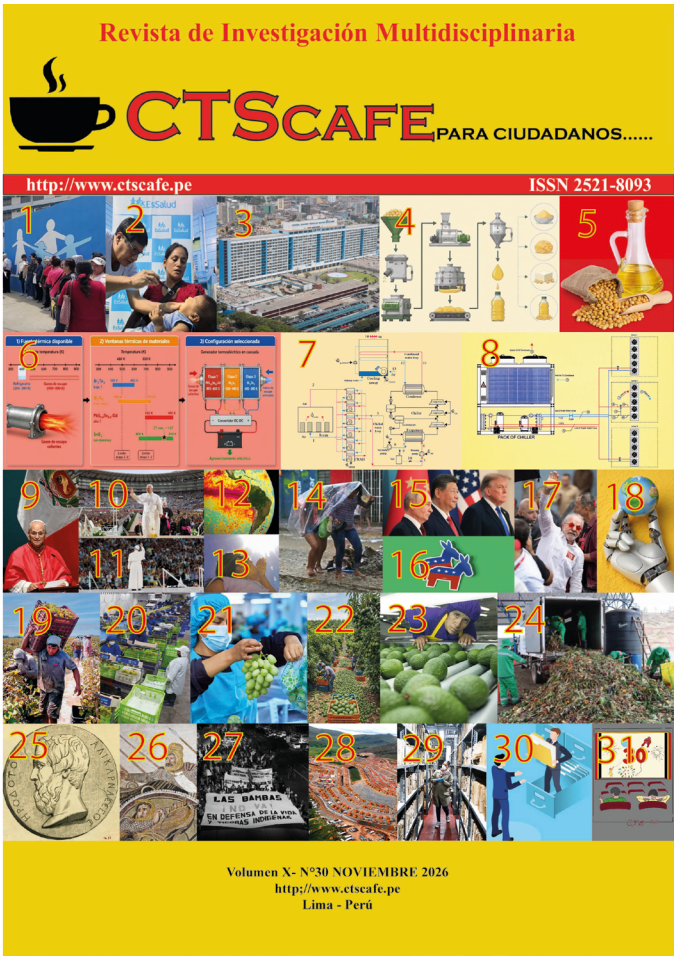
**Palabras clave**: cinco en español, inglés, y francés

**Cuerpo**: El cuerpo del artículo debe presentar:

1- **Introducción**
2- **Material y métodos**
3- **Resultados**
4- **Discusión**
5- **Agradecimiento**
6- **Conclusiones**
7- **Literatura Citada** (Incluirá todas las referencias citadas en el texto dispuestas solamente en orden alfabético y sin numeración. La cita se inicia con el apellido del primer autor a continuación, sin coma, las iniciales del nombre separadas con puntos y sin espacio. El segundo y tercer autor deben de tener las iniciales de los nombre y a continuación el apellido. El último autor se diferenciara por que le antecede el símbolo &. Si hubiesen más de tres autores pueden ser indicados con la abreviatura et al. Los nombres de las publicaciones periódicas (revistas) pueden ir en la abreviatura oficial considerada según su código ISSN. El código DOI debe ser colocado al final de la referencia. En la literatura citada solamente se usa letra tipo normal, no itálica, no versalita).

# ÍNDICE DE IMÁGENES






## De izquierda a derecha

1. https://www.defensoria.gob.pe/lambayeque-defensoria-del-pueblo-permitio-ampliar-atencion-y-reducir-colas-en-hospital-essalud-de-chiclayo/
2. https://www.radionacional.gob.pe/noticias/nacional/essalud-lleva-atencion-medica-a-santa-rosa-y-caballococha-en-loreto
3. tomado de @EsSaludPeru
4. Instagram.com/p/DbEgeVMm-e6/
5. https://delagarzamateriasprimas.com/aceite-de-soya/
6. Saavedra, Baquerizo & Zarate (2026)
7. Angulo, Huarcusi, Lopez, Barrientos & Suarez (2026)
8. Angulo, Huarcusi, Lopez, Barrientos & Suarez (2026)
9. https://www.lafm.com.co/internacional/papa-leon-xiv-peru-lima-gira-del-argentina-uruguay-417351#google_vignette
10. https://www.facebook.com/identidadlatina/posts/papa-leo-en-el-estadio-nacional-como-es-costumbre-la-visita-del-papa-incluy%C3%B3-un-/1998772628095432/
11. https://diariocorreo.pe/peru/papa-leon-xiv-en-peru-como-obtener-entradas-gratis-para-la-vigilia-en-el-estadio-nacional-noticia/
12. https://www.infobae.com/peru/2026/10/08/fenomeno-el-nino-cambia-el-panorama-climatico-en-peru-se-adelantan-las-lluvias-en-todo-el-litoral-y-preven-records-de-temperatura/
13. https://www.infobae.com/peru/2024/02/28/el-sol-no-dara-tregua-temperaturas-altas-continuaran-en-lima-hasta-la-primera-quincena-de-marzo-pese-a-fin-de-ola-de-calor/
14. https://andina.pe/agencia/noticia-el-nino-podria-tener-un-mayor-impacto-a-fines-2026-esto-dicen-las-agencias-del-clima-1070134.aspx#google_vignette
15. https://crnnoticias.com/cumbre-apec-2026-china-acuerdos-comercio-energia/
16. https://www.rfi.fr/es/programas/noticias-de-am%C3%A9rica/20260628-estados-unidos-el-partido-dem%C3%B3crata-en-agitaci%C3%B3n
17. https://www.facebook.com/LaCronicaDeHoy/posts/-luiz-in%C3%A1cio-lula-da-silva-gan%C3%B3-la-segunda-vuelta-de-las-elecciones-presidencial/122254981148288324/
18. Imagen trabajada en base a https://www.elcorreo.com/sociedad/robots-aduenan-20171108215153-nt.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.elcorreo.com%2Fsociedad%2Frobots-aduenan-20171108215153-nt.html
19. https://www.agroperu.pe/midagri-articula-venta-directa-de-161-toneladas-de-uva-de-productores-de-canete-a-la-industria-pisquera/
20. https://andina.pe/agencia/noticia-peru-se-consolida-como-principal-productor-y-exportador-mundial-uvas-1095802.aspx
21. https://andina.pe/agencia/noticia-peru-se-consolida-como-principal-productor-y-exportador-mundial-uvas-1095802.aspx
22. https://www.facebook.com/Asociaciondeexportadores/posts/la-palta-peruana-no-se-detiene-si-bien-se-exporta-todo-el-a%C3%B1o-su-campa%C3%B1a-va-de-m/1380634897435509/
23. https://elcomercio.pe/economia/peru/agricultores-arequipenos-quintuplicaron-su-produccion-anual-de-palta-hass-afirmo-midagri-nndc-noticia/
24. https://andina.pe/agencia/noticia-economia-circular-comunidad-cusquena-produce-abono-natural-a-partir-residuos-organicos-1007744.aspxhttps://polarexpres.es/realizar-transporte-medicamentos/
25. https://www.thecollector.com/ancient-egypt-animals-herodotus-histories/?utm_source=Pinterest&utm_medium=organic
26. https://www.flickr.com/photos/mymuk/6548565499?utm_source=Pinterest&utm_medium=organic
27. https://dialogoshumanos.pe/2022/05/01/conflicto-en-las-bambas-cuando-el-reclamo-por-los-derechos-humanos-y-comunales-es-respondido-con-represion-estatal/
28. https://www.rcrperu.com/se-necesita-un-plan-de-desarrollo-para-que-las-bambas-pueda-beneficiar-a-las-regiones-de-apurimac-y-el-cusco/
29. https://www.elperuano.pe/noticia/157101-archivo-general-de-la-nacion-la-institucion-que-salvaguarda-los-documentos-del-peru
30. https://www.unir.net/revista/humanidades/archivista-archivologo/
31. Ilustración realizada por M. Villavicencio (noviembre 2026)

REVISTA DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA

CTSCAFE Para ciudadanos…

http://www.ctscafe.pe

Volumen X- N° 30 Noviembre 2026



Contáctenos en nuestro correo electrónico

**revistactscafe@ctscafe.pe**

Página Web:

**http://ctscafe.pe**