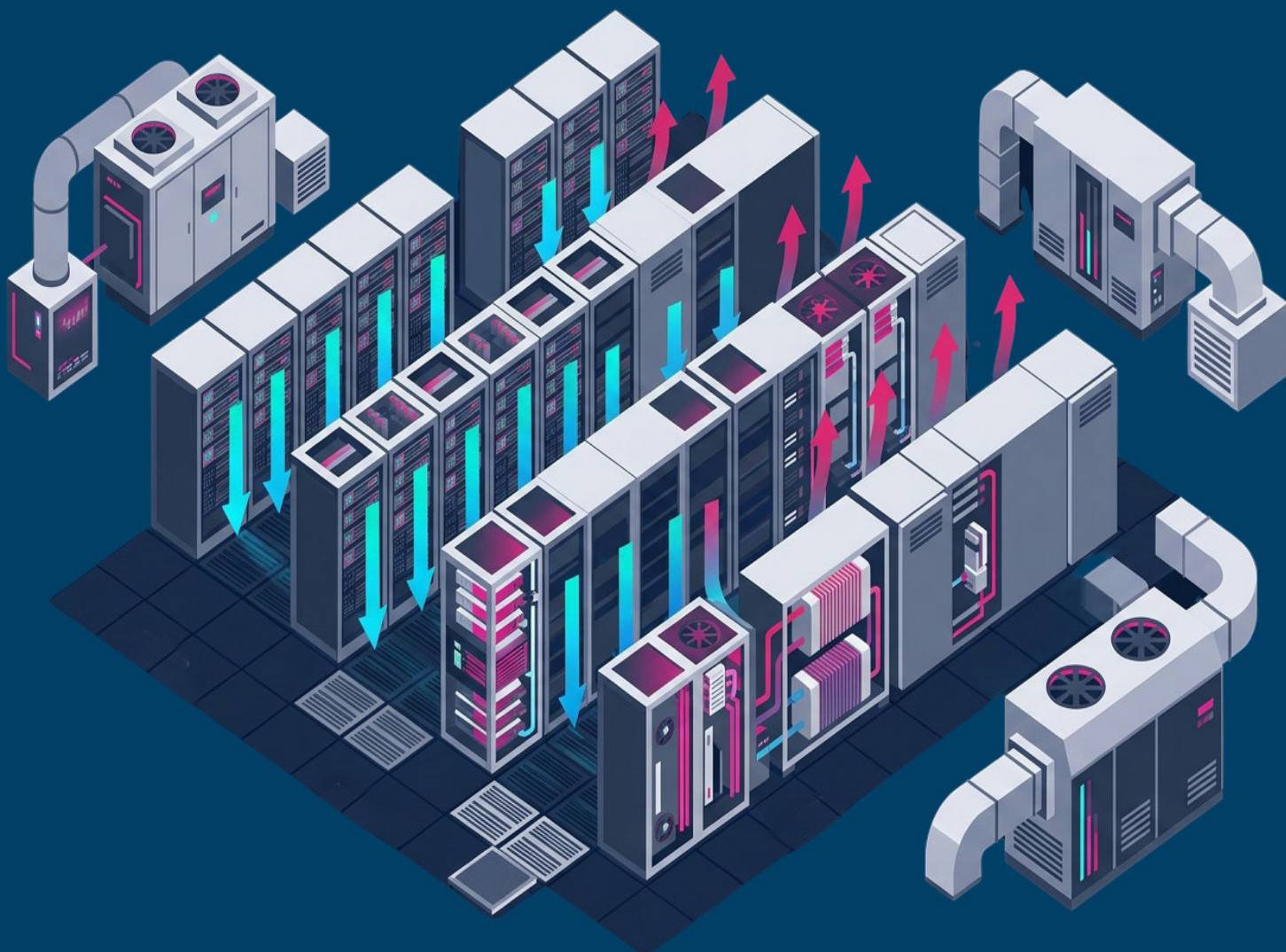


Enfriar para no fallar

Psicrometría aplicada, tecnologías de refrigeración y gestión del flujo de aire: la guía completa del sistema de enfriamiento en data centers



Introducción

El calor es el enemigo silencioso número uno del hardware en un data center. A diferencia de un corte eléctrico, que provoca una parada inmediata, el fallo térmico actúa de forma progresiva: eleva la temperatura de los componentes, reduce su vida útil, provoca errores intermitentes y finalmente detiene el sistema por protección térmica o por daño permanente.

El sistema de enfriamiento representa en muchos data centers entre el 30% y el 40% del consumo total de energía. Es, junto con el sistema eléctrico, el subsistema de mayor impacto en la disponibilidad y en la eficiencia operativa. Sin embargo, su complejidad técnica hace que sea también uno de los sistemas más frecuentemente mal diseñados, mal dimensionados o mal operados.

Este e-book cubre la disciplina completa del enfriamiento en data centers: desde los fundamentos de psicrometría que definen las condiciones de operación, hasta las tecnologías más avanzadas de free cooling y gestión del flujo de aire. Está orientado a profesionales con base técnica que quieren entender el sistema en profundidad, no solo operar sus controles.

Lo que encontrarás en este e-book

- Psicrometría aplicada: DB, WB, punto de rocío.
- Por qué el aire acondicionado de confort mata los servidores.
- Rangos ASHRAE: temperatura y humedad en equipos TI.
- Las 5 tecnologías principales de enfriamiento.
- Free Cooling: directo e indirecto.
- Gestión del flujo de aire y pasillos fríos/calientes.
- Contención de pasillos: la práctica más impactante en eficiencia.
- Densidad de rack y su relación con el sistema de enfriamiento.

Psicrometría aplicada al data center

La psicrometría es la rama de la física que estudia las propiedades termodinámicas del aire húmedo. En el contexto de un data center, tres magnitudes psicrométricas son fundamentales para entender y diseñar correctamente el sistema de enfriamiento: la temperatura de bulbo seco (DB), la temperatura de bulbo húmedo (WB) y el punto de rocío (DP).

Las tres temperaturas que definen el ambiente

Magnitud	Símbolo	Definición	Relevancia en DC
Temperatura de bulbo seco	DB	Temperatura del aire medida con un termómetro convencional no afectado por la humedad	Es la referencia principal de los rangos operativos de equipos TI. La más usada en especificaciones de fabricante
Temperatura de bulbo húmedo	WB	Temperatura mínima alcanzable por evaporación del agua. Siempre igual o inferior a DB	Indicador combinado de temperatura y humedad. Usada para evaluar sistemas de enfriamiento evaporativo
Punto de rocío	DP	Temperatura a la que el vapor de agua alcanza el 100% de HR y comienza a condensarse	Límite crítico: si la superficie de un componente está por debajo del DP, hay condensación y riesgo de cortocircuito

El punto de rocío: el límite que no se puede cruzar

El punto de rocío es el parámetro psicométrico más crítico desde el punto de vista operativo. Cuando la temperatura de cualquier superficie en la sala de servidores cae por debajo del punto de rocío, el vapor de agua del aire se condensa sobre esa superficie. Si esa superficie es un circuito electrónico, una tarjeta de memoria o un conector, el resultado es un cortocircuito inmediato o una corrosión acelerada por condensación.

Valor máximo del punto de rocío

El punto de rocío máximo admisible en la sala de servidores es 15°C, según las guías ASHRAE TC 9.9. Un punto de rocío superior a 15°C aumenta significativamente el riesgo de superar el 60% de HR, con el consiguiente riesgo de corrosión y condensación en el interior de los equipos. Este valor debe monitorizarse en tiempo real, no inferirse de la temperatura y la HR.

Conversiones de unidades térmicas esenciales

El sistema de enfriamiento de un data center trabaja con varias unidades de medida que deben manejarse con fluidez para interpretar correctamente las especificaciones de equipos y los balances térmicos:

Conversión	Resultado	Uso típico
1 W	3,41 BTU/h	Convertir consumo de servidores (W) a calor a evacuar (BTU/h)
1 W	0,000284 RT	Expresar carga térmica en toneladas de refrigeración
1 kW	3.412 BTU/h	Dimensionamiento de sistemas CRAC/CRAH
1 RT	12.000 BTU/h	Capacidad de unidades de refrigeración en mercado americano
1 CFM	Área (ft²) × velocidad del aire (ft/min)	Cálculo del caudal de aire en sala

Los rangos ASHRAE, qué temperatura debe tener tu data center

Una de las confusiones más extendidas entre operadores de data centers es qué temperatura debe mantenerse en la sala de servidores. La respuesta no es intuitiva: la temperatura de la sala es un indicador incompleto. Lo que importa es la temperatura de entrada de aire a los equipos TI, que es la variable que ASHRAE regula.

Rangos de operación térmica para equipos Clase A1

Parámetro	Rango recomendado	Rango permitido	Condición
Temperatura de entrada (DB)	18°C – 27°C	15°C – 32°C	Rango permitido solo en períodos cortos
Humedad relativa	40% – 60%	8% – 80%	Rango permitido solo en períodos cortos
Punto de rocío máximo	– 9°C a 15°C	–12°C a 17°C	No superar 15°C en operación continua
Cambio máximo de temperatura	5°C/hora	5°C/hora	Para evitar estrés térmico en componentes
Altitud máxima	950 m	3.000 m sobre el nivel del mar	Por encima requiere derating de potencia

La oportunidad energética de ASHRAE

La revisión de las guías ASHRAE amplió el rango recomendado hasta los 27°C en la entrada del equipo. Esto permite elevar la temperatura de suministro del sistema de enfriamiento, lo que tiene un impacto directo en la eficiencia: cada grado de aumento en la temperatura de suministro puede representar entre un 2% y un 4% de ahorro en el consumo del sistema de enfriamiento. Los data centers que operan a 18°C están dejando dinero sobre la mesa.

Dónde medir la temperatura

La temperatura debe medirse en la entrada de aire de cada equipo TI, no en el pasillo frío ni en la sala en general. La temperatura del pasillo frío puede diferir significativamente de la temperatura de entrada real si hay mezcla de aire caliente y frío, paneles perforados mal posicionados o fugas en el suelo elevado. La monitorización de temperatura a nivel de rack, en la parte frontal de cada unidad de TI, es la única medida operativamente válida.

Precisión vs. confort. Por qué el aire acondicionado convencional no sirve

Uno de los errores más frecuentes en instalaciones pequeñas o en salas de servidores improvisadas es utilizar unidades de aire acondicionado de confort (diseñadas para personas) para enfriar equipos TI. Las diferencias entre ambos sistemas son tan fundamentales que esta decisión puede comprometer completamente la disponibilidad de los equipos.

Característica	A/C de confort	A/C de precisión (CRAC/CRAH)	Impacto operativo
Flujo de aire	< 100 CFM/kW (insuficiente)	>= 158 CFM/kW	El A/C de confort no mueve suficiente aire para evacuar el calor de los servidores
Relación calor sensible (SHR)	<= 70%	> 90%	El A/C de confort 'malgasta' capacidad en deshumidificación en lugar de enfriar
Control de HR	No dispone o muy básico	Humidificación y deshumidificación precisas	Sin control de HR, riesgo de ESD o corrosión
Redundancia interna	Sin componentes redundantes	Compresores redundantes, tolerante a fallos	El A/C de confort no está diseñado para 7x24
Velocidad de respuesta	Lenta	Rápida, responde en segundos a cambios de carga	Los servidores generan picos de calor súbitos que el A/C de confort no puede gestionar

El coste real del A/C de confort en sala de servidores

Un sistema de A/C de confort operando en una sala de servidores no solo es ineficiente: es activamente peligroso. Su incapacidad para mover suficiente caudal de aire garantiza puntos calientes en los racks, su falta de control preciso de HR genera riesgo de ESD o corrosión, y su ausencia de componentes redundantes convierte cualquier avería en un evento crítico.

Tecnologías de enfriamiento, de la expansión directa al free cooling

El mercado ofrece múltiples tecnologías para el enfriamiento de data centers, cada una con sus ventajas, limitaciones y rangos de aplicación óptimos. La elección de la tecnología correcta depende de la potencia a evacuar, la densidad de rack, la ubicación geográfica, la disponibilidad de agua y los objetivos de eficiencia energética

Expansión directa (DX) – tecnología base

Los sistemas de expansión directa (Direct Expansion) utilizan un circuito de refrigerante que absorbe el calor de la sala directamente en la unidad CRAC, lo comprime y lo expulsa al exterior a través de una unidad condensadora. Es la tecnología más extendida en instalaciones de pequeño y mediano tamaño.

- Componente interior: unidad CRAC (Computer Room Air Conditioner), que contiene el compresor, el evaporador y los controles.
- Componente exterior: unidad condensadora, que rechaza el calor al exterior mediante aire.

- Ventaja principal: instalación relativamente sencilla, sin necesidad de planta de agua helada.
- Limitación principal: la eficiencia cae significativamente cuando la temperatura exterior es alta; no es la opción más eficiente para grandes potencias.

Agua helada (Chiller) – la solución para grandes potencias

Los sistemas de agua helada separan el proceso de enfriamiento en dos circuitos independientes: el circuito primario de agua helada, que distribuye frío a las unidades CRAH en la sala de servidores, y el circuito secundario de rechazo de calor, que evacúa el calor al exterior mediante torres de enfriamiento o condensadores.

- Componente principal: chiller, que produce el agua helada mediante compresión o absorción.
- Distribución en sala: unidades CRAH (Computer Room Air Handler), sin compresor propio, que intercambian calor con el agua helada.
- Rechazo de calor: torres de refrigeración, condensadores evaporativos o condensadores de aire.
- Ventaja principal: mayor eficiencia a gran escala, posibilidad de free cooling integrado, centralización del mantenimiento.
- Limitación: mayor complejidad, mayor inversión inicial, requiere sistema de tratamiento de agua.

CRAC vs. CRAH: la diferencia que define el sistema

CRAC (Computer Room Air Conditioner): tiene compresor integrado. Sistema autónomo, típico de instalaciones DX. CRAH (Computer Room Air Handler): sin compresor. Solo intercambia calor con el agua helada que le suministra el chiller. Más eficiente en grandes instalaciones, pero dependiente del sistema de agua helada. La distinción es crítica para entender la arquitectura del sistema de enfriamiento

Free Cooling – enfriar sin compresores

El free cooling es la estrategia de mayor impacto en la eficiencia energética de los data centers modernos. Su principio es simple: en lugar de usar compresores para producir frío, aprovecha las condiciones del exterior cuando la temperatura ambiente es suficientemente baja para evacuar el calor sin refrigeración mecánica.

Existen dos modalidades con características muy diferentes:

Modalidad	Principio	Ventaja	Limitación
Free Cooling Directo (Airside)	Introduce aire exterior frío directamente en la sala, en un único paso	Máxima eficiencia. Sin intercambiador de calor intermedio. Coste operativo mínimo	El aire exterior entra en contacto directo con los equipos: requiere filtración exhaustiva. Solo viable cuando la calidad del aire exterior es aceptable
Free Cooling Indirecto	El aire exterior enfría el agua del circuito primario a través de un intercambiador de calor. El aire no entra en la sala	El aire exterior nunca contacta con los equipos. Válido en entornos con contaminación exterior. Compatible con sistemas Chiller existentes	Menor eficiencia que el directo por la pérdida en el intercambiador. Mayor inversión inicial

El número de horas al año en que el free cooling es activable (horas de economizador) depende del clima de la ubicación. En climas templados del norte de Europa, el free cooling puede cubrir más del 70% de las horas anuales. En climas cálidos mediterráneos o tropicales, el porcentaje es significativamente menor.

Enfriamiento InRow — llevar el frío al rack

Las unidades InRow son una evolución del enfriamiento de sala hacia el enfriamiento por fila. En lugar de distribuir aire frío desde unidades perimetrales o en el techo, las unidades InRow se instalan directamente entre los racks, suministrando aire frío exactamente donde se necesita y recogiendo el aire caliente sin recorridos largos.

- Ventaja principal: elimina prácticamente la mezcla de aire caliente y frío. Muy eficaz para densidades de rack elevadas (> 10 kW/rack).
- Diseño de sala: compatible tanto con suelo elevado como con suelo plano.
- Limitación: mayor número de unidades a gestionar y mantener. Mayor coste inicial por unidad de potencia.

Refrigeración líquida directa — el futuro para alta densidad

Para densidades de rack superiores a 20 kW/rack, el aire como medio de transferencia de calor deja de ser suficiente. La refrigeración líquida directa (Direct Liquid Cooling) lleva el líquido refrigerante hasta el propio servidor, intercambiando calor directamente en la CPU, GPU o en las tarjetas de memoria.

Existen dos enfoques:

- Rear-door heat exchanger: intercambiador de calor integrado en la puerta trasera del rack, que recoge el calor del aire de escape antes de que salga al pasillo caliente.
- Direct liquid to chip: el líquido circula en placas frías pegadas directamente a los procesadores. Máxima eficiencia pero requiere equipos específicamente diseñados para ello.

Gestión del flujo de aire, la práctica más impactante en eficiencia

Tener la capacidad de enfriamiento correcta es condición necesaria pero no suficiente. Si el aire frío no llega a la entrada de los equipos TI de forma eficiente, y si el aire caliente se mezcla con el frío antes de ser evacuado, el sistema de enfriamiento trabaja el doble para conseguir la mitad. La gestión del flujo de aire (Air Management) es la disciplina que resuelve este problema.

Los tres principios físicos del flujo de aire

- El aire frío es más denso que el aire caliente: el aire caliente sube naturalmente y el frío tiende a bajar. El diseño del sistema de distribución debe aprovechar este comportamiento, no combatirlo.
- El calor debe ser removido de la sala de servidores: si el calor no se evacúa eficientemente, se acumula y recircula, elevando progresivamente la temperatura de entrada a los equipos.
- El flujo de aire es tan importante como la capacidad de enfriamiento: el aire frío por sí solo no enfría los equipos si no llega a su entrada al mismo ritmo que se consume. El caudal (CFM) es tan crítico como la temperatura del aire suministrado.

Pasillo frío / pasillo caliente — el estándar del sector

La distribución de equipos en pasillos fríos y calientes alternos es la práctica de gestión del flujo de aire más extendida y respaldada por las normas TIA-942 y BICSI-002. Su lógica es simple: todos los racks de una fila orientan su parte frontal (toma de aire frío) hacia el mismo pasillo, y su parte trasera (expulsión de aire caliente) hacia el pasillo opuesto.

- Las dimensiones mínimas de los pasillos son:
- Pasillo frío: mínimo 4 pies (aprox. 1,2 metros) de anchura.
 - Pasillo caliente: mínimo 14 pies (aprox. 4,3 metros) de anchura para facilitar la evacuación del calor.

Por qué funciona el pasillo frío/caliente

Sin esta distribución, el aire caliente expulsado por la parte trasera de los racks puede ser aspirado por los equipos del rack de enfrente, creando un bucle de recirculación que sube progresivamente la temperatura de entrada. Con pasillos alternados, el aire frío y el caliente tienen rutas físicamente separadas, eliminando la mezcla y permitiendo que el sistema de enfriamiento trabaje de forma mucho más eficiente.

Contención de pasillos — el siguiente nivel de eficiencia

La contención de pasillos lleva el concepto del pasillo frío/caliente a su conclusión lógica: si la separación entre aire frío y caliente es buena, contener físicamente uno de los dos pasillos es mejor todavía. Existen dos enfoques:

Enfoque	Qué se contiene	Cómo funciona	Eficiencia relativa
Contención de pasillo frío (CFCC)	El pasillo frío queda cerrado con paneles y puertas	Todo el aire frío del suelo elevado va directamente a la entrada de los racks, sin posibilidad de mezcla con el caliente	Alta. Permite elevar la temperatura de suministro manteniendo la temperatura de entrada a los equipos
Contención de pasillo caliente (HCCC)	El pasillo caliente queda cerrado y se conecta directamente al retorno de las unidades CRAC/CRAH	El aire caliente va directo al retorno sin circular por la sala. Máximo control de la temperatura de retorno	Muy alta. Es la configuración más eficiente energéticamente en la mayoría de escenarios

La implementación de contención de pasillos es, en términos de retorno de inversión energético, una de las medidas más rentables disponibles en un data center existente. En instalaciones con mezcla significativa de aire, puede reducir el consumo del sistema de enfriamiento entre un 15% y un 30%.

Tres métodos de distribución del aire frío

Método	Cómo distribuye el aire	Tipo de suelo	Caso de uso típico
Underfloor (bajo suelo)	El suelo elevado actúa como plenum. Paneles perforados en el pasillo frío dirigen el aire hacia los racks	Suelo elevado obligatorio	La distribución más extendida. Eficiente para densidades medias (hasta 10 kW/rack)
Overhead (aéreo)	El aire frío se distribuye por conductos en el techo y se dirige hacia los pasillos fríos	Compatible con suelo plano	Necesario cuando no hay suelo elevado. Requiere diseño cuidadoso de conductos para evitar puntos calientes
InRow	Unidades de enfriamiento instaladas entre los racks, suministrando aire frío a muy corta distancia de los equipos	Compatible con ambos	Densidades altas (> 10 kW/rack). Complemento al sistema perimetral cuando la densidad crece

Densidad de rack y su relación con el sistema de enfriamiento

La densidad de rack es el parámetro que más ha evolucionado en los últimos años y el que más presión ejerce sobre los sistemas de enfriamiento tradicionales. El auge de la computación de alto rendimiento, la IA y el machine learning ha llevado la densidad media de rack de los 5-6 kW/rack de hace una década a valores de 20, 30 o incluso 100 kW/rack en instalaciones especializadas.

Clasificación por densidad y tecnología de enfriamiento asociada

Densidad	kW/rack	Tipo de equipo típico	Tecnología de enfriamiento recomendada
Baja densidad	Hasta 5 kW	Servidores de pizza, Telco, networking	CRAC/CRAH perimetral con suelo elevado estándar
Densidad media	5 – 10 kW	Servidores empresariales, almacenamiento	CRAC/CRAH con contención de pasillos
Alta densidad	10 – 20 kW	HPC, almacenamiento de alta velocidad	InRow + contención, o water-cooled rear door
Muy alta densidad	> 20 kW	Blade servers, GPU para IA, HPC	Refrigeración líquida directa (DLC), inmersión

El problema del rack mixto

Una sala con racks de densidades muy diferentes (algunos a 3 kW, otros a 15 kW en la misma fila) es uno de los escenarios más difíciles de gestionar para el sistema de enfriamiento. El sistema se dimensiona para el peor caso, pero la distribución del aire no puede adaptarse dinámicamente. La solución es agrupar los racks por densidad en zonas dedicadas con sistemas de enfriamiento específicos para cada zona.

El PUE como indicador de eficiencia del enfriamiento

El PUE (Power Usage Effectiveness) es el indicador estándar de eficiencia energética de un data center. Se define como la energía total consumida por la instalación dividida por la energía consumida por los equipos TI. Un PUE de 1,0 significa que toda la energía va a los equipos TI (imposible en la práctica); un PUE de 2,0 significa que por cada kWh que consumen los servidores, se consume otro kWh adicional en la infraestructura.

El sistema de enfriamiento es el principal responsable del PUE en la mayoría de las instalaciones. Las estrategias que más impactan en su reducción son:

- Elevar la temperatura de suministro de aire hasta el máximo del rango ASHRAE recomendado (27°C en entrada de equipo).
- Implementar free cooling para reducir o eliminar el uso de compresores en horas de temperatura exterior favorable.
- Implementar contención de pasillos para eliminar la mezcla de aire y reducir el caudal necesario.
- Eliminar paneles ciegos faltantes en los racks para evitar recirculación interna.
- Auditar el sistema de suelo elevado para identificar y sellar fugas de aire.

Nivel de PUE	Evaluación	Característica típica
< 1,2	Excelente	Free cooling, contención, alta densidad. Hiperescaladores
1,2 – 1,5	Bueno	Contención de pasillos, temperatura elevada de suministro
1,5 – 2,0	Mejorable	Sin contención, temperatura baja de suministro, sin free cooling
> 2,0	Deficiente	Sin gestión de aire, A/C de confort, sobredimensionamiento severo

Conclusión: El enfriamiento como ventaja operativa

El sistema de enfriamiento de un data center no es solo un servicio auxiliar que mantiene la temperatura dentro de rango. Es un sistema que determina la disponibilidad, la eficiencia energética, el coste operativo y la capacidad de escalar la densidad de cómputo. Gestionarlo con rigor es, en el sentido más literal, una ventaja competitiva.

Los profesionales que entienden la psicrometría pueden anticipar riesgos de condensación que otros no ven. Los que conocen las diferencias entre tecnologías pueden dimensionar correctamente el sistema desde el diseño. Los que implementan contención de pasillos y optimizan la temperatura de suministro transforman esa comprensión en euros ahorrados en la factura eléctrica cada mes.

Los cinco principios del enfriamiento eficiente

1. La temperatura de referencia es la entrada al equipo TI, no la temperatura de la sala. Mide donde importa.
2. El A/C de confort no es una alternativa al A/C de precisión: es un riesgo operativo documentado.
3. Eleva la temperatura de suministro hasta el límite del rango recomendado ASHRAE. Cada grado cuenta.
4. Implementa contención de pasillos antes de añadir más unidades de refrigeración. La eficiencia del flujo de aire tiene mejor ROI que añadir potencia de enfriamiento.
5. Clasifica los racks por densidad y asigna tecnología de enfriamiento específica para cada zona. Un sistema único para densidades mixtas es siempre ineficiente.