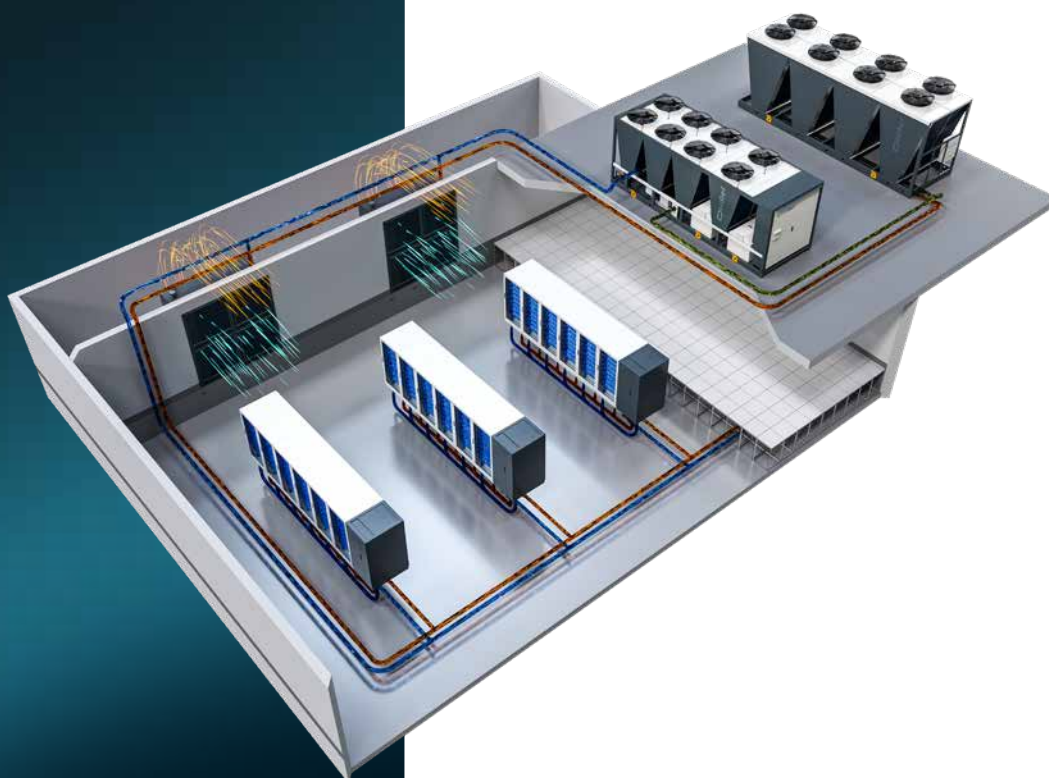


 HiRef

LIBRO BLANCO

Liquid cooling

EL IMPERATIVO DE 2026



ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	p. 4	9.2	LA DISTRIBUCIÓN A 800 V CC	p. 21
2	LA EVOLUCIÓN DE LA CARGA EN LOS DATA CENTERS	p. 5	9.3	FUENTES DE ALIMENTACIÓN (PSU) REFRIGERADAS POR LÍQUIDO	p. 21
2.1	DE LA «DENSITY ERA» A LA «POWER ERA»	p. 5	9.4	RETOS DE LOS 800 V: SEGURIDAD Y GESTIÓN AMBIENTAL	p. 21
2.2	LA EVOLUCIÓN DEL TDP EN LOS PROCESADORES NVIDIA	p. 5	10	CONCLUSIONES	p. 22
2.3	EL LÍMITE FÍSICO DEL AIRE: EL «THERMAL WALL»	p. 5	11	APÉNDICE A	p. 23
2.4	CONCLUSIÓN	p. 5	11.1	GESTIÓN QUÍMICA DEL FLUIDO Y COMPATIBILIDAD DE LOS MATERIALES	p. 23
3	TERMODINÁMICA DE LA REFRIGERACIÓN LÍQUIDA	p. 6	12	APÉNDICE B	p. 24
3.1	AIRE CONTRA LÍQUIDO	p. 6	12.1	PROTOCOLO OPERATIVO DE PUESTA EN SERVICIO Y PRUEBAS	p. 24
3.2	CONDUCCIÓN Y CONVECCIÓN	p. 6			
3.3	EL PAPEL DEL PG25 EN LA DIRECT-TO-CHIP	p. 6			
3.4	FLUIDOS PARA REFRIGERACIÓN DIRECT-TO-CHIP BIFÁSICA Y POR INMERSIÓN	p. 6			
4	TECNOLOGÍA DE REFRIGERACIÓN	p. 7			
4.1	DIRECT-TO-CHIP (DTC) MONOFÁSICA	p. 7			
4.2	DIRECT-TO-CHIP (DTC) BIFÁSICA	p. 8			
4.3	REFRIGERACIÓN POR INMERSIÓN (IC) MONOFÁSICA	p. 9			
4.4	REFRIGERACIÓN POR INMERSIÓN (IC) BIFÁSICA	p. 10			
5	ECOSISTEMA DE LA REFRIGERACIÓN LÍQUIDA	p. 11			
5.1	ARQUITECTURA DE SALAS HÍBRIDAS	p. 11			
5.2	EL ECOSISTEMA COMPLETO DE LA REFRIGERACIÓN LÍQUIDA	p. 14			
5.3	LA DISTRIBUCIÓN DEL LÍQUIDO EN LA SALA	p. 14			
6	COOLANT DISTRIBUTION UNIT	p. 16			
6.1	COMPONENTES DE LA CDU	p. 16			
6.2	LÓGICAS DE REGULACIÓN	p. 17			
6.3	COMPLIANCE SERVIDOR NVIDIA	p. 17			
7	EFICIENCIA, SOSTENIBILIDAD Y RECUPERACIÓN DE CALOR	p. 18			
7.1	MÁS ALLÁ DEL PUE: LA DEFINICIÓN DEL ERF	p. 18			
7.2	ESTRATEGIAS DE RECUPERACIÓN DE CALOR	p. 18			
7.3	MARCO NORMATIVO	p. 18			
8	RETOS OPERATIVOS, MANTENIMIENTO Y SEGURIDAD	p. 20			
8.1	GESTIÓN QUÍMICA Y MONITORIZACIÓN DEL PG25	p. 20			
8.2	MANTENIMIENTO ORDINARIO DE LA CDU	p. 20			
8.3	MANTENIMIENTO DE LOS SERVIDORES	p. 20			
9	FRONTERAS FUTURAS: DATA CENTERS A 800 V	p. 21			
9.1	SITUACIÓN ACTUAL: DISTRIBUCIÓN A 400 V CA	p. 21			

1 INTRODUCCIÓN

El sector de los data centers está atravesando la transformación más profunda de los últimos treinta años. A lo largo de décadas, las salas de servidores se han diseñado y construido siguiendo el enfoque «air-first»: los suelos técnicos elevados, los falsos techos y la compartimentación de los pasillos han permitido optimizar la refrigeración por aire y aprovechar al máximo su potencial. Sin embargo, la llegada de la Inteligencia Artificial Generativa y de la computación de alto rendimiento (HPC, por sus siglas en inglés) ha introducido cargas térmicas que superan los límites físicos de la convección forzada por aire, llevando al mundo de los Data Centers a un auténtico punto de ruptura.

En 2026, los procesadores han superado con creces el umbral de los 100W de Potencia de Diseño Térmico (TDP, por sus siglas en inglés), y la cuestión ya no es «si» adoptar la Refrigeración Líquida, sino más bien «cómo» implementarla de forma sencilla, escalable e integrada con la infraestructura existente.

Este Libro Blanco tiene como objetivo guiar a los profesionales del sector a través de la transición de la refrigeración por aire a la Refrigeración Líquida, un cambio que, además del medio físico de eliminación del calor, se refleja también en todo el ecosistema de la sala: desde colectores y tuberías, pasando por los conectores rápidos, hasta la regulación de la presión y la temperatura en los circuitos.

KEY POINTS

- **Superación del «Thermal Wall»:** análisis de las razones por las que las infraestructuras tradicionales basadas sobre sistemas CRAC/CRAH ya no resultan técnicamente sostenibles para densidades superiores a 40 kW por rack;
- **Tecnologías de refrigeración líquida:** análisis técnico de las soluciones Direct-to-Chip y de los sistemas por inmersión, con evaluación de las arquitecturas, los principios de funcionamiento y los escenarios de aplicación;
- **Unidad de Distribución de Refrigerante (CDU):** examen de los componentes clave, del principio de funcionamiento y de las lógicas de regulación y control que rigen la distribución del fluido refrigerante;
- **Sostenibilidad medible:** evaluación del impacto de la Refrigeración Líquida en la reducción del PUE, con valores cercanos a 1,1, y sobre las oportunidades de recuperación de calor para aplicaciones de calefacción urbana.

2 LA EVOLUCIÓN DE LA CARGA EN LOS DATA CENTERS

2.1 De la «Density Era» a la «Power Era»

Desde el punto de vista histórico, el diseño de los data centers se ha basado en la optimización de los flujos de aire: en la última década, los racks de 5 kW han sido sustituidos gradualmente por soluciones cada vez más eficientes, hasta alcanzar los 15 kW por rack. Esta transición fue posible gracias a la maximización del potencial de la refrigeración por aire, con la llegada de la compartimentación de pasillos calientes/fríos y el aumento de altura de los suelos sobreelevados para reducir las pérdidas de carga y crear un «pulmón» de presión estática uniforme al servicio de la sala. Sin embargo, entre 2019 y 2020, la llegada de la Computación de Alto Rendimiento (HPC) ha supuesto un cambio gradual, pero irreversible, en las reglas del juego: los servidores HPC han aumentado su densidad hasta tal punto que han alcanzado el umbral de los 40 kW/rack. Con cargas de este tipo, el aire deja de ser una solución eficiente para la refrigeración, ya que las velocidades necesarias para extraer el calor de los servidores generarían turbulencias tales que harían que el proceso resultara ineficaz. Actualmente, hemos superado los 100 kW/rack y nos estamos preparando para alcanzar los 200 kW/rack: la refrigeración por aire, en su acepción tradicional, ya no es una opción válida.

2.2 La evolución del TDP en los procesadores NVIDIA

El principal impulsor de esta aceleración es la evolución de la Potencia de Diseño Térmico (TDP). Hace no más de 10 años, una CPU de gama alta funcionaba en el rango de 150-200 W. Hoy en día, la situación ha cambiado radicalmente:

- **NVIDIA V100/A100:** 300/400 W por módulo. Ha marcado la primera llegada real de los 40 kW/rack al sector comercial;
- **NVIDIA H100 (Hopper):** TDP hasta 700 W por módulo;
- **NVIDIA B200 (Blackwell):** TDP que alcanza los 1000 W - 1200 W por cada GPU.

Cuando se integran 8 de estas GPU en un único nodo de servidor (HGX), el calor generado en unas pocas unidades de rack es comparable al de toda una hilera de Data Centers de hace diez años. Disipar 10 kW de un solo servidor 4U mediante ventiladores requeriría caudales de aire y velocidades de rotación tales que generarían vibraciones perjudiciales para los componentes y niveles de potencia acústica superiores a 100 dB(A).

Generación	Año	TDP Máx	Sistema de Refrigeración Recomendado
P100 (Pascal)	2016	300W	Refrigeración por aire (tradicional)
V100 (Volta)	2017	300W	Refrigeración por aire (tradicional)
A100 (Ampere)	2020	400W - 500W	Refrigeración por aire (rear-door)
H100 (Hopper)	2023	700W	Refrigeración Líquida Direct-to-Chip
B200 (Blackwell)	2025	1000W - 1200W	Refrigeración Líquida Direct-to-Chip

2.3 El límite físico del aire: el «Thermal Wall».

El concepto de «Thermal Wall» se pone de manifiesto cuando el coste energético y el espacio necesario para mover el aire superan los beneficios de la propia refrigeración. Hay tres factores que hacen que la refrigeración por aire resulte obsoleta para las cargas de IA:

- **Capacidad térmica:** el agua tiene una capacidad térmica volumétrica alrededor de 3400 veces superior a la del aire, por lo que para disipar incluso una gran cantidad de calor en un servidor basta con el caudal que circula por un tubo de unos pocos milímetros de diámetro;
- **Enfoque:** para refrigerar chips de 1000 W con aire, se necesitarían temperaturas de impulsión muy bajas (18-20 °C), lo que reduciría al mínimo la posibilidad de aprovechar el free-cooling. El líquido, en cambio, permite trabajar con un caudal menor y, por consiguiente, con temperaturas de impulsión más altas;
- **Consumo de los ventiladores:** la potencia absorbida por los ventiladores crece de forma cúbica con respecto al caudal: en racks de alta densidad refrigerados por aire (40 kW/rack), los ventiladores pueden consumir hasta el 20 % de la potencia total del servidor.

2.4 Conclusión

Desde el punto de vista del diseño, superar los 40/kW por rack convierte al aire en un medio obsoleto: por tal razón, es imperativa la transición a la refrigeración líquida.

3 TERMODINÁMICA DE LA REFRIGERACIÓN LÍQUIDA

3.1 Aire contra líquido

La superioridad de la refrigeración Líquida en comparación con la refrigeración por aire no es cuantitativa, sino cualitativa.

Desde el punto de vista termodinámico, el parámetro más significativo para la eficiencia en la transmisión del calor es la **Capacidad térmica volumétrica [kJ/m³K]**. La conductividad térmica del agua es más de **3600 veces superior** a la del aire; por lo tanto, para el mismo calor transportado, el caudal de líquido necesario será mucho menor que el de aire.

Para comprender el impacto espacial de este concepto, analicemos las necesidades para disipar **100 kW**, con un deltaT de 10 °C, en un solo rack:

- **Refrigeración por aire:** se necesitaría un caudal de unos 30.000 m³/h, lo cual, obviamente, es imposible de llevar a la práctica;
- **Refrigeración Líquida (PG25):** se necesitan unos 9 m³/h, es decir, 2.5 l/s. Este caudal se puede gestionar con tuberías de pocos centímetros de diámetro, lo que reduce radicalmente el espacio que ocupa la infraestructura.

3.2 Conducción y Convección

La refrigeración por aire tradicional utiliza la convección forzada, un proceso limitado por la bajísima conductividad térmica del aire, que de hecho actúa como un aislante natural.

En la refrigeración líquida, y concretamente en los sistemas Direct-to-Chip (DTC), el calor se elimina mediante placas frías de cobre. Este enfoque permite:

- **Minimizar la resistencia térmica:** el calor pasa por el die (pastilla) del procesador al fluido a través de un conducto metálico de alta conductividad, reduciendo al mínimo los gradientes térmicos;
- **Habilitar la «Warm Water Cooling» (refrigeración por agua templada):** gracias a la eficiencia del líquido, es posible trabajar con temperaturas de impulsión elevadas (35 °C - 45 °C) manteniendo, en cualquier caso, los procesadores dentro de los límites operativos. Esto permite utilizar el free-cooling en zonas en las que históricamente no era posible, eliminando la dependencia de las enfriadoras y reduciendo drásticamente el PUE (Power Usage Effectiveness).

3.3 El papel del PG25 en la Direct-to-Chip

Pese a que el agua pura es un excelente fluido portador, no se recomienda su uso en un data center debido a los riesgos de corrosión, crecimiento biológico y congelación. El estándar industrial para el DTC se ha consolidado en torno al uso de PG25 (mezcla al 25 % de propilenglicol y al 75 % de agua desmineralizada con inhibidores).

El PG25 representa el compromiso técnico ideal:

1. **Protección contra la corrosión:** los inhibidores químicos protegen los circuitos secundarios compuestos por diferentes metales (cobre, acero inoxidable), previniendo así la corrosión galvánica;
2. **Control biológico:** el propilenglicol actúa como inhibidor natural, previniendo la formación de algas y biopelículas que podrían obstruir los microcanales de las placas frías, cuyas aletas suelen tener una anchura inferior a 200 micras;
3. **Seguridad:** a diferencia del etilenglicol, el propilenglicol está clasificado como de baja toxicidad, por lo que es seguro para su uso en ambientes interiores con presencia de personal;
4. **Rendimiento:** aunque la adición de glicol aumenta ligeramente la viscosidad, el rendimiento térmico no difiere mucho de aquel del agua pura.

Propiedades	Aire	Agua (Técnica)	PG25 (Agua/Glicol)	Relación (PG25/Aire)
Densidad [kg/m³]	1.149	994,4	1017,5	~885x
Calor específico [kJ/kg·K]	1.006	4.179	3.960	~3.93x
Conductividad Térmica [W/m·K]	0.026	0.621	0.493	~18,96x
Capacidad Térmica Volumétrica [kJ/m³·K]	1.1156	4155,6	4029,3	~3611x

Notas: propiedades calculadas a 34 °C

3.4 Fluidos para refrigeración direct-to-chip bifásica y por inmersión

A diferencia de la DTC monofásica, las tecnologías de refrigeración por inmersión (Immersion Cooling) y la DTC bifásica requieren el uso exclusivo de fluidos dieléctricos (aceites sintéticos o hidrocarburos fluorados) para garantizar el aislamiento eléctrico de los componentes.

Aunque en la refrigeración por inmersión monofásica hay que aceptar un compromiso termodinámico, ya que los fluidos dieléctricos tienen un calor específico y una conductividad un 50 % inferiores a los del PG25, la DTC y la IC bifásica superan esta limitación aprovechando el calor latente de evaporación: en estos sistemas se utilizan fluidos como las hidrofluoroolefinas (HFO) o las cetonas fluoradas, que se evaporan a temperaturas controladas (en el rango de 30-60 °C).

Sin embargo, en la actualidad, la elección del fluido está estrechamente asociada a la sostenibilidad: la industria está abandonando los perfluorocarbonos (PFC) y los hidrofluorocarbonos (HFC) debido a un PCA (potencial de calentamiento atmosférico) prohibitivo, a menudo superior a 1000, y a las crecientes restricciones sobre los PFAS («Forever Chemicals»). El paso a fluidos de nueva generación con un PCA < 1 se ha convertido en un requisito esencial para el cumplimiento de los criterios ESG, garantizando que la elevada densidad de cálculo no se traduzca en un riesgo normativo o en un impacto atmosférico insostenible.

4 TECNOLOGÍA DE REFRIGERACIÓN

4.1 Direct-to-chip (DTC) monofásica

La refrigeración Direct-to-chip (DTC) monofásica es el estándar industrial actual para la IA y la HPC.

El calor se disipa mediante una placa fría de cobre (Cold Plate) con microcanales internos, montada directamente sobre el procesador (CPU/GPU) con un material de interfaz térmica. Esta tecnología utiliza el PG25, que permanece siempre en estado líquido.

VENTAJAS:

- **Eficiencia específica:** elimina aproximadamente el 85 % del calor del nodo actuando directamente sobre los componentes que más energía consumen;
- **Versatilidad:** permite configuraciones «híbridas», en las que el líquido refrigera los procesadores y un flujo de aire reducido se encarga de los componentes secundarios (RAM, VRM, almacenamiento);
- **Readaptación:** es la solución más sencilla para integrar en data centers existentes con layout de racks estándares de 19".

DESVENTAJAS:

- **Gestión de fugas:** requiere el uso de conectores rápidos anti-goteo (Quick Disconnects - QD) de alta calidad y sensores de detección de fugas en el interior del chasis;
- **Complejidad del cableado** la incorporación de colectores y tuberías en el interior del servidor reduce el espacio para el mantenimiento físico de los componentes.

4.2 Direct-to-chip (DTC) bifásica

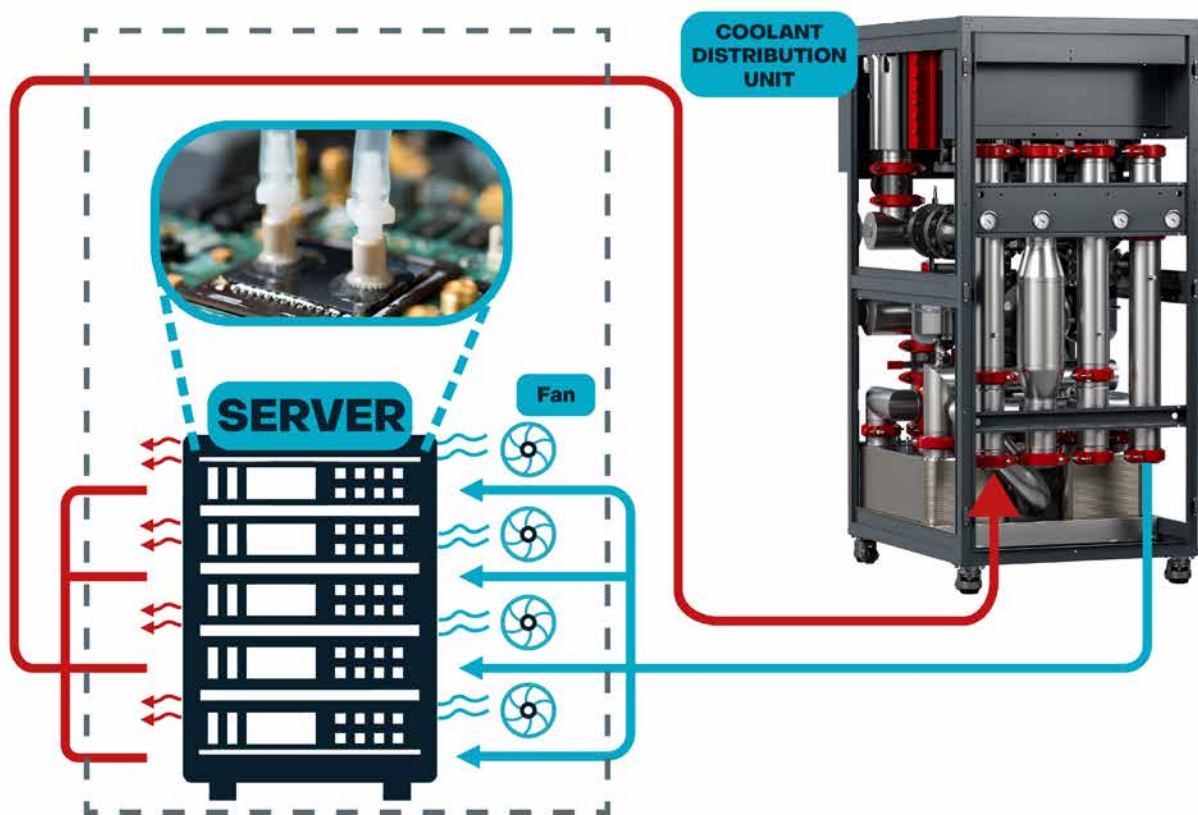
En la DTC bifásica, el fluido en el interior de la placa fría (Cold Plate) cambia de estado, pasando de líquido a vapor. Aprovecha el calor latente de evaporación para absorber energía, sin aumentar la temperatura del fluido.

VENTAJAS:

- **Elevada capacidad térmica:** ideal para chips de próxima generación que superarán los 1000-1500 W, en los que un flujo monofásico requeriría caudales excesivos;
- **Uniformidad térmica:** garantiza que todo el chip esté a la misma temperatura (la temperatura de saturación del líquido), eliminando peligrosos gradientes térmicos.

DESVENTAJAS:

- **Control de la presión:** requiere sistemas totalmente estancos y válvulas de control de presión muy precisas para la gestión del vapor;
- **Costes:** el uso de fluidos refrigerantes especiales y el diseño de conductos para gestionar el retorno del vapor aumentan drásticamente el CAPEX;
- **Fluido:** muchos de los fluidos ofrecidos en el mercado tienen un PCA (Potencial de Calentamiento Global) alto.



4.3 Refrigeración por inmersión (IC) monofásica

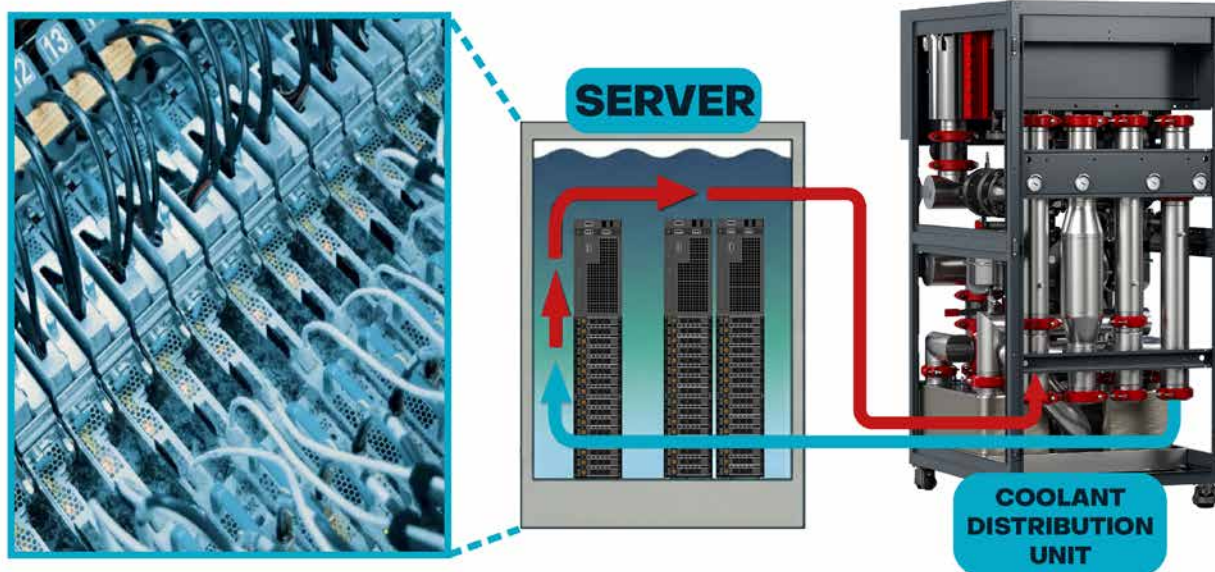
Todo el servidor se sumerge en un baño de fluido dieléctrico, que se hace circular de forma forzada hacia un intercambiador de calor externo. En esta configuración de IC, el fluido permanece siempre en estado líquido.

VENTAJAS:

- **Refrigeración 100 % líquida:** La IC bifásica disipa el 100 % del calor del servidor, incluidas las fuentes de alimentación y las redes, eliminando por completo la necesidad de refrigeración por aire y, en consecuencia, los ventiladores y el ruido;
- **Protección del hardware:** El fluido dieléctrico protege la electrónica de la oxidación, la humedad y el polvo, reduciendo las tasas de fallo de las placas de circuito impreso (PCB).

DESVENTAJAS:

- **Mantenimiento:** Extraer un servidor requiere complejos procedimientos de escurrido y limpieza;
- **Peso/diseño:** Requiere suelos con una capacidad de carga muy alta y una revisión total del diseño de la sala, con tanques horizontales en lugar de racks verticales.



4.4 Refrigeración por inmersión (IC) bifásica

En esta configuración, al entrar en contacto con los componentes, el fluido dieléctrico hierve. El vapor generado asciende hacia la parte superior del tanque, donde se condensa en un serpentín refrigerado por agua y vuelve a caer por gravedad.

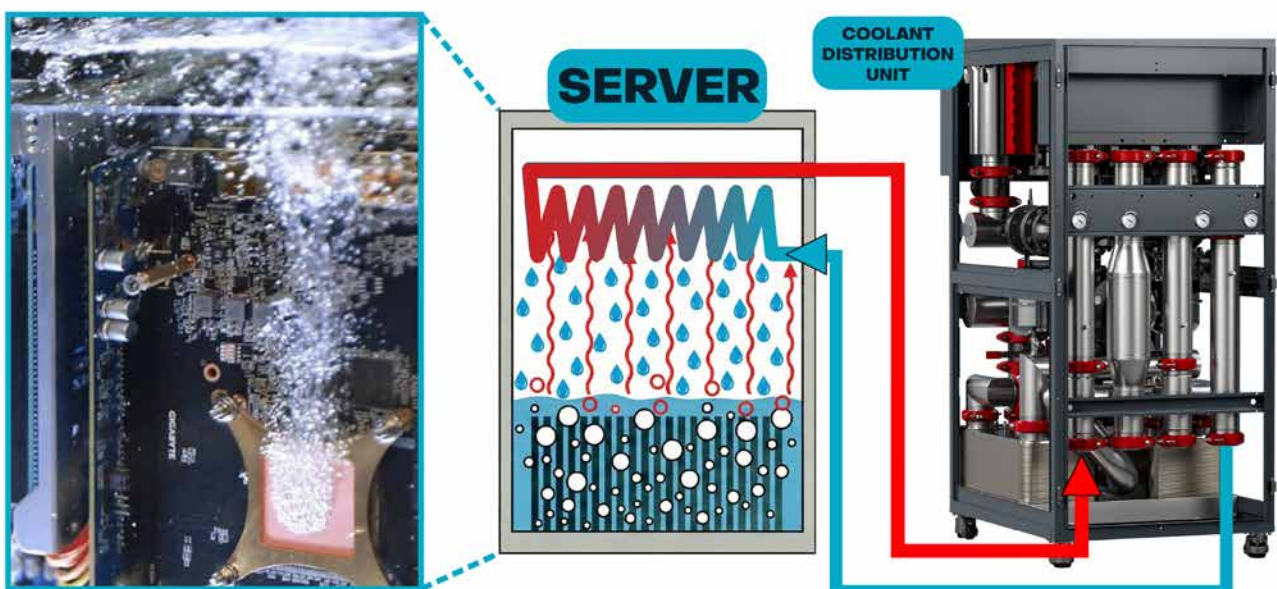
VENTAJAS:

- **Eficiencia:** permite alcanzar PUE muy bajos (hasta 1.02), utilizando agua de refrigeración en el circuito primario a temperaturas muy elevadas;
- **Sin bombas en el circuito secundario:** el movimiento del fluido responde a la termodinámica.

DESVENTAJAS:

- **Precio del fluido:** los fluidos dieléctricos para cambio de fase son muy caros y están sujetos a estrictas normativas medioambientales;
- **Mantenimiento:** extraer un servidor requiere complejos procedimientos de escurrido y limpieza;
- **Peso/diseño:** requiere suelos con una capacidad de carga muy elevada y una revisión total del diseño de la sala, con tanques horizontales en lugar de racks verticales;
- **Fluido:** muchos de los fluidos ofrecidos en el mercado tienen un PCA (Potencial de Calentamiento Global) alto.

Tecnología	Densidad soportada	Complejidad de mantenimiento	Integración	Aplicación de destino
DTC Monofásica	40 - 120 kW	Media	Buena (híbrida)	Entrenamiento de IA / HPC estándar
DTC Bifásica	100 - 200 kW	Alta	Limitada	Chip > 1500 W
Por inmersión Monofásica / Bifásica	100 - 300+ kW	Alta	Compleja	Supercomputing



5 ECOSISTEMA DE LA REFRIGERACIÓN LÍQUIDA

5.1 Arquitectura de salas híbridas

A pesar de la eficiencia de las placas frías, la refrigeración Direct-to-Chip (DTC) actúa de forma específica solo sobre los componentes de alta densidad térmica (CPU, GPU, VRM, RAM). Sin embargo, un servidor contiene una multitud de otros componentes –inductores, condensadores, chipsets de la placa base, unidades de almacenamiento y fuentes de alimentación (PSU) – que siguen disipando calor en el aire interior del chasis. Por lo general, la refrigeración líquida en un sistema DTC consigue eliminar entre el 80 % y el 85 % de la carga térmica total del rack. La parte restante se disipa en el aire: por lo tanto, el data center de 2026 no es «solo líquido», sino híbrido.

Es importante destacar que en las salas con sistemas por inmersión, donde los servidores se refrigeran al 100 % por líquido, sigue siendo importante prever un control y una climatización adecuados del aire en la sala. Esto resulta necesario para disipar la carga térmica debida a los operadores, las luces, etc., y además para mantener las condiciones termohigrométricas en una zona de confort para los mismos operadores.

5.1.1 CDU + Intercambiadores de calor Rear Door (RDHx)

El RDHx es, básicamente, un radiador de líquido instalado en la puerta trasera del rack. No se trata de una tecnología DTC en sentido estricto, sino que actúa como un «filtro térmico» que neutraliza el calor generado por los servidores antes de que salga del rack. Esta se considera como la arquitectura híbrida «pura». La CDU gestiona el circuito secundario y la disipación del calor en las placas frías, mientras que las puertas traseras (rear doors) capturan el calor residual que sale de los servidores.

- **Ventaja:** el calor nunca entra en la sala. El rack es térmicamente neutro;
- **Ideal para:** salas sin pasillos compartimentados o con techos bajos donde la gestión de los flujos de aire resulta difícil.

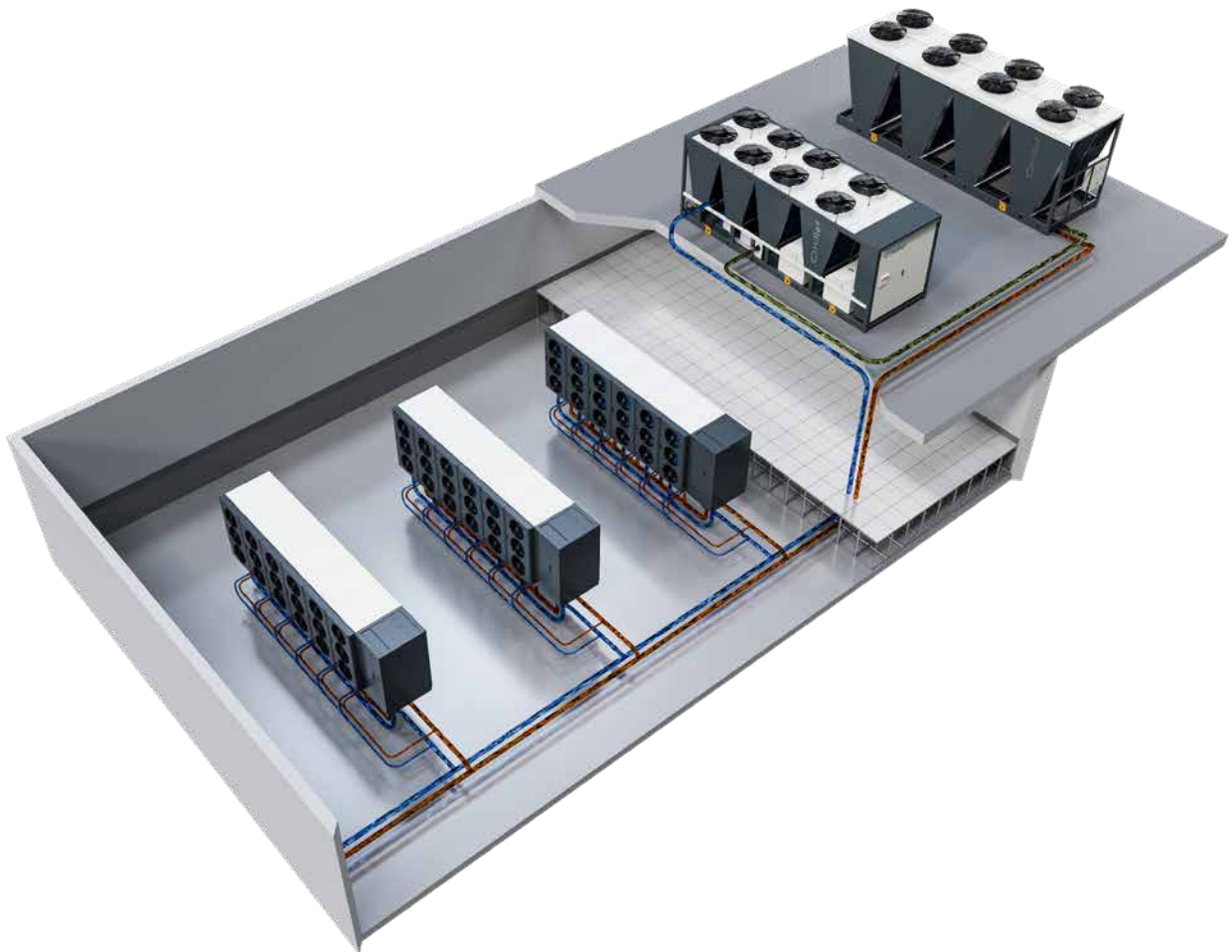
La Rear Door representa una tecnología versátil, que también puede adoptarse de forma independiente para salas de 30-40 kW/rack.

VENTAJAS:

- **Readaptación:** no requiere modificaciones en los nodos ni la instalación de tubos en los procesadores;
- **Room Neutral:** hace que el data center sea independiente del sistema de aire acondicionado (CRAC), ya que el rack no emite aire caliente a la sala.

DESVENTAJAS:

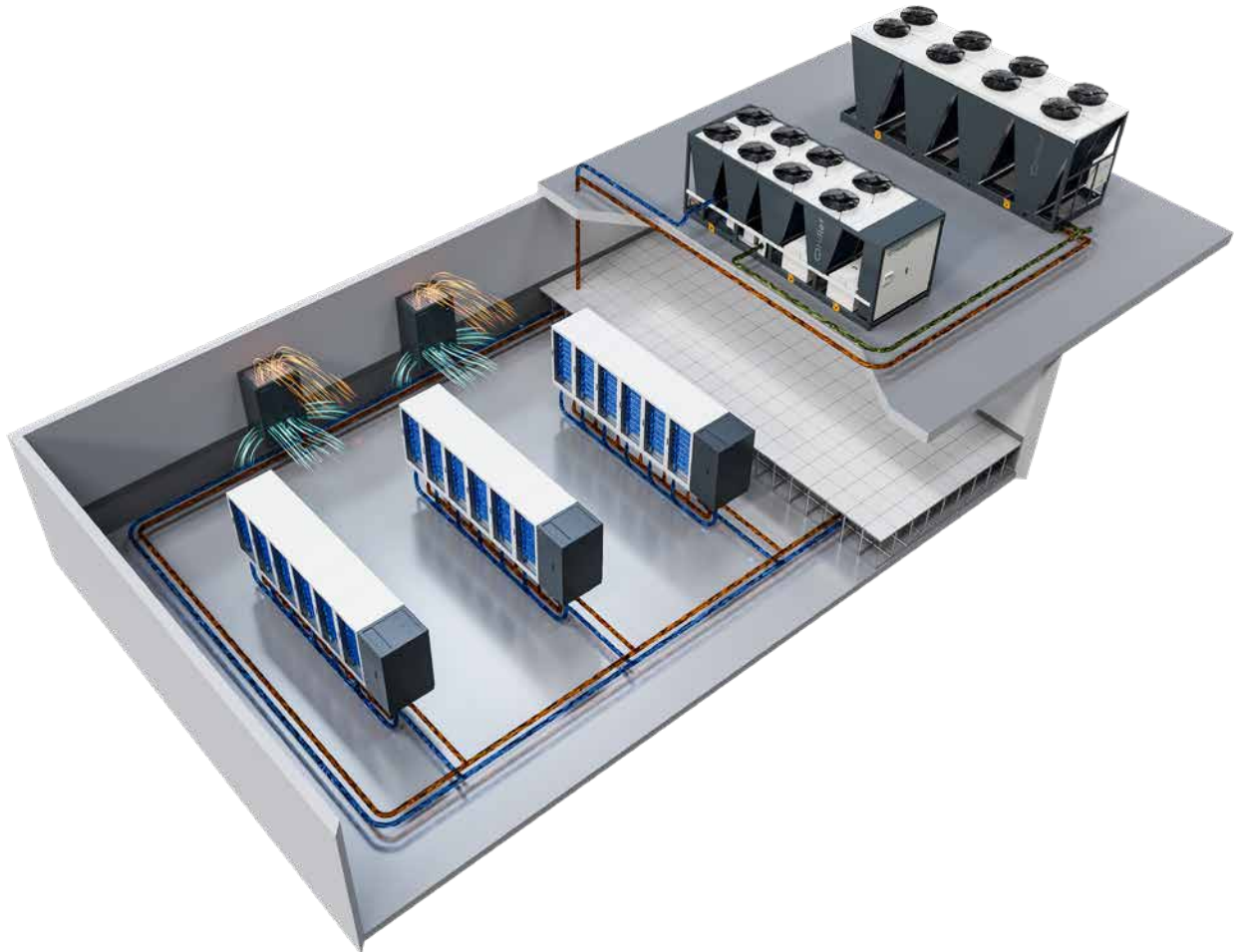
- **Dependencia de los ventiladores:** en cualquier caso, los servidores deben tener potentes ventiladores internos para impulsar el aire a través de la puerta, lo que provoca un alto consumo y ruido;
- **Límite físico del intercambio de aire:** por encima de 40 kW, la refrigeración por aire, por sí sola, ya no es una opción viable y debe integrarse con la refrigeración líquida.



5.1.2 CDU + Unidades perimetrales (CRAC/CRAH)

En este escenario, la CDU gestiona el circuito secundario y la refrigeración de las placas frías, mientras que las unidades perimetrales (CRAH) se encargan de la carga residual y del control de la humedad ambiente.

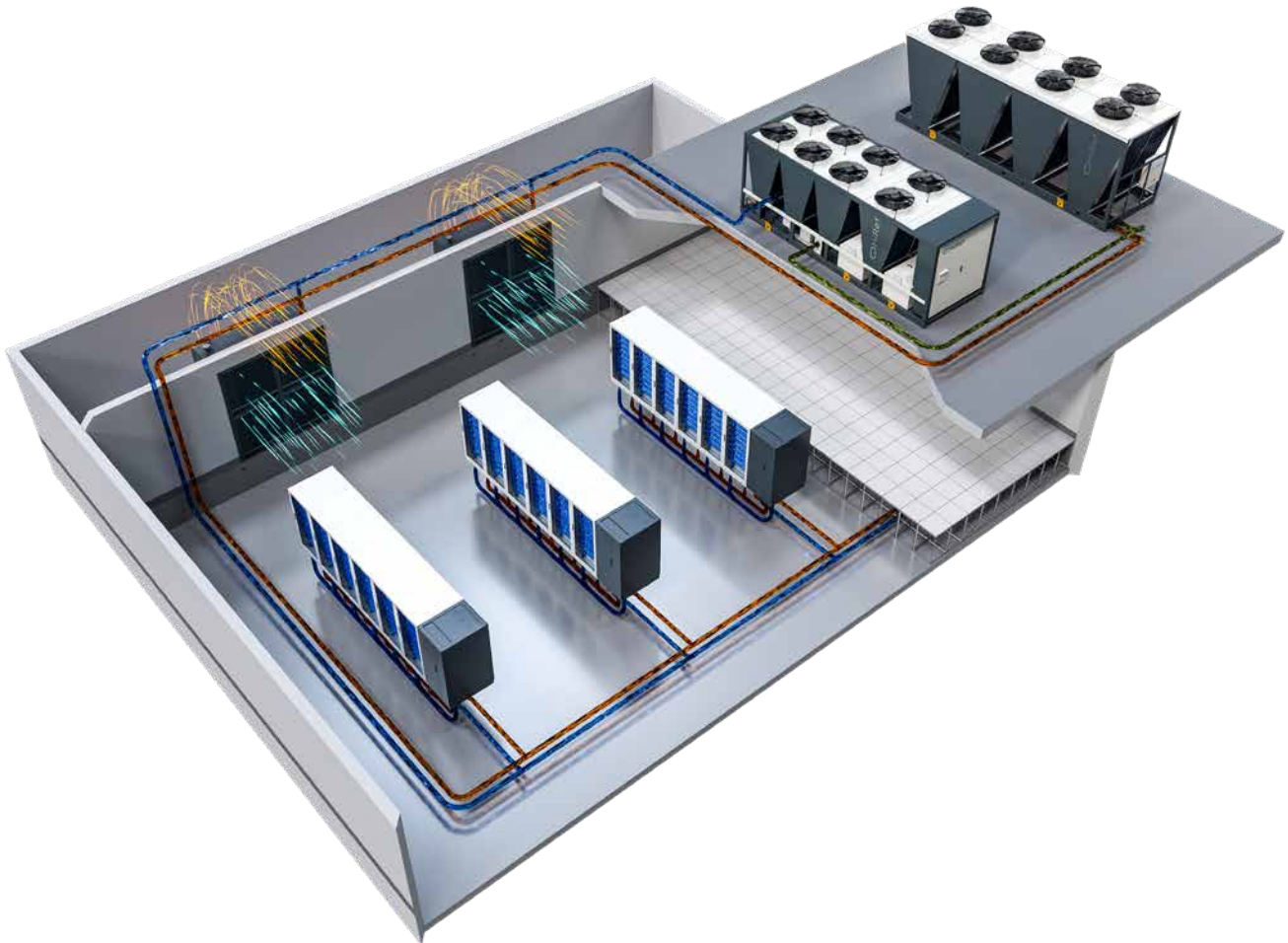
- **Ventaja:** permite reutilizar la infraestructura existente en caso de readaptación;
- **Ideal para:** data centers existentes que incorporan clústeres de IA en zonas específicas de la sala de datos.



5.1.3 CDU + Fanwall

En este escenario, la CDU gestiona el circuito secundario y la refrigeración de las placas frías, mientras que la parte de la carga que se disipa en el aire es gestionada por las fanwalls.

- **Ventaja:** alta eficiencia energética, superficie ocupada reducida en la sala de datos (white space);
- **Ideal para:** data centers grandes a hiperscala DTC diseñados desde cero.



5.2 El ecosistema completo de la Refrigeración Líquida

El ecosistema completo de la Refrigeración Líquida puede verse como una pirámide de intercambios y flujos de calor en 3 niveles:

1. **Nivel del servidor:** la placa fría captura el calor generado por el chip y lo transfiere al PG25;
2. **Nivel de la CDU:** el intercambiador de placas dentro de la CDU transfiere el calor del circuito secundario (PG25) al circuito primario (normalmente agua o agua glicolada);
3. **Nivel exterior:** la enfriadora y/o el Dry Cooler disipan el calor al exterior.

La integración correcta entre la CDU, los equipos por aire y los sistemas de disipación exterior redefine el perfil energético del data center, permitiendo reducir el pPUE de refrigeración por debajo de 1.1. La ventaja competitiva de esta arquitectura reside en el análisis estacional: al operar con temperaturas elevadas en el circuito primario, es posible aprovechar el free-cooling durante la mayoría de los días del año en muchísimas zonas climáticas, limitando la

intervención de las enfriadoras únicamente a los raros picos térmicos estivales.

Este enfoque permite maximizar el ahorro energético durante los periodos fríos y templados, convirtiendo la eficiencia estacional en un factor clave para la reducción de los costes de explotación (OpEx) y el cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad ambiental.

5.3 La distribución del líquido en la sala

Mientras que en los data centers refrigerados por aire la distribución se realiza a través de un suelo técnico elevado, en la refrigeración líquida la distribución consiste en una red física de tuberías que debe diseñarse para garantizar la continuidad operativa y el equilibrio del sistema, además de minimizar el riesgo de fugas. Los elementos clave del circuito de distribución son los siguientes:

- **Colectores de distribución:** los colectores distribuyen el fluido del circuito secundario entre los distintos servidores de un mismo rack. Fabricados en acero inoxidable AISI 304/316L con soldaduras orbitales/TIG para eliminar rebabas internas que podrían desprenderse y obstruir las placas frías;

- **Conectores rápidos (Quick Disconnects - QD):** son los conectores que sirven de enlace entre los distintos componentes críticos del circuito. Son los componentes que más se someten a esfuerzo a lo largo de la vida útil del data center. Es fundamental utilizar conectores «Non-Drip» (antigoteo) con tecnología de cara plana para evitar que caigan gotas de líquido sobre los servidores.

6 COOLANT DISTRIBUTION UNIT



La Unidad de Distribución de Refrigerante (CDU) es la clave para la escalabilidad de los data centers modernos. El reto técnico actual consiste en maximizar la densidad de intercambio térmico reduciendo al mínimo la superficie ocupada.

Las unidades de última generación pueden gestionar cargas térmicas masivas, alcanzando potencias de hasta 1400 kW en un espacio de tan solo 900 mm x 1200 mm. Esta densidad de potencia es posible gracias a una ingeniería avanzada que garantiza un enfoque térmico de 4K, lo que permite operar en régimen de full free-cooling durante la mayor parte del año operativo, optimizando drásticamente el PUE global.

La CDU actúa como barrera de separación y sistema de gestión entre los dos mundos hidráulicos que componen el data center:

1. **Circuito Primario (Facility Water System - FWS):** el circuito del lado del edificio, conectado a sistemas de disipación externos, que suele funcionar con un deltaT de 10 °C;
2. **Circuito secundario (Technology Cooling System - TCS):** el circuito del lado de TI, por donde circula el fluido más «noble», el PG25. Aquí, la CDU garantiza la estabilidad de la presión, la pureza del fluido y un control preciso de la temperatura para evitar la condensación

6.1 Componentes de la CDU



INTERCAMBIADORES DE CALOR

La transferencia de calor entre los fluidos primario y secundario se produce a través de intercambiadores de placas de acero inoxidable AISI 316L y soldadura fuerte de cobre, que se caracterizan por un elevado coeficiente de intercambio y una excelente resistencia a la corrosión. Los intercambiadores están dimensionados para un enfoque nominal de 4 K.

GRUPO DE BOMBEO

El desplazamiento del fluido del circuito secundario se confía a bombas centrífugas de alta eficiencia en configuración redundante N+1. Las bombas se controlan mediante inversers por lo que pueden modular el caudal en función de la carga térmica instantánea de los racks

FILTROS

Los microcanales de las placas frías tienen unas dimensiones del orden de 200 micras; por lo tanto, es imprescindible disponer un sistema de filtración adecuado para evitar su posible suciedad u obstrucción. A tal fin, la CDU integra un sistema de filtros dúplex redundantes N+1:

- Los cartuchos filtrantes pueden seleccionarse con una finura de hasta 25 micras, lo que garantiza la retención incluso de las partículas más pequeñas que podrían provocar erosión u obstrucción en los servidores;
- La configuración dúplex permite aislar y sustituir el cartucho «en caliente», sin necesidad de interrumpir la continuidad operativa del circuito secundario y garantizando el tiempo de

funcionamiento incluso durante las fases de mantenimiento ordinario.

VÁLVULA PICV

Dentro de la CDU, la válvula de control independiente de la presión (Pressure Independent Control Valve, PICV) desempeña una doble función como regulador de caudal y estabilizador de presión, actuando como el «regulador de precisión» del circuito primario;

- **Independencia de la presión:** a diferencia de las válvulas de regulación tradicionales, la PICV mantiene un caudal constante hacia el intercambiador de calor, independientemente de las fluctuaciones de presión en la red de agua del data center;
- **Optimización del deltaT:** al regular de forma dinámica el flujo de agua en función de la carga térmica real de los servidores, la PICV garantiza que al salir del primario el agua esté a la temperatura máxima posible. Esto es esencial para la eficiencia de los sistemas de «calefacción urbana» o de las enfriadoras en modo free-cooling.

CONEXIONES CONFIGURABLES

Para adaptarse tanto a edificios nuevos (Greenfield) como a readaptaciones de salas existentes (Retrofitting), la CDU está diseñada con salidas configurables tanto en la parte superior como en la inferior. Esta predisposición permite acoplar las tuberías que proceden del techo o del suelo técnico elevado sin necesidad de modificaciones estructurales en la máquina ni de añadir acoplamientos o racores durante el montaje.

CONEXIÓN DE CARGA

Con el fin de facilitar el llenado del circuito secundario con PG25, la CDU cuenta en el circuito secundario con un conector de carga preparado para acoplarse a la bomba de llenado. En algunos casos, la bomba puede integrarse directamente en el bastidor de la CDU.

6.2 Lógicas de regulación

La complejidad de la refrigeración líquida radica en la extrema dinamicidad de las cargas. A diferencia de las cargas de trabajo empresariales tradicionales, que presentan variaciones predecibles y graduales, el ecosistema de IA introduce una volatilidad térmica sin precedentes.

DINÁMICA DE LAS CARGAS DURANTE EL ENTRENAMIENTO

Durante las fases de Entrenamiento de un Modelo de Lenguaje Grande (LLM, por sus siglas en inglés), los servidores no funcionan a un régimen constante. La carga térmica sigue la evolución de los «lotes» de cálculo:

- **Picos instantáneos:** cuando el clúster inicia el procesamiento de un conjunto de datos, el consumo energético de un rack puede pasar de 10 kW (en reposo/espera) a 80-100 kW en pocos segundos;
- **Oscilaciones cíclicas:** durante el entrenamiento, se observan ciclos continuos de «Compute» (carga al 100 %) seguidos de pausas muy breves de «Sync/Communication» (descenso de la carga), creando un perfil térmico en forma de «diente de sierra».

A diferencia de los sistemas de refrigeración por aire, en los que la masa de aire de la sala actúa como una especie de «volante térmico», en la refrigeración líquida el calor se transfiere de forma

instantánea al fluido. Sin una CDU que module el caudal, estas oscilaciones causarían estrés térmico en los dies de los procesadores, acortando su vida útil o provocando fenómenos de estrangulamiento térmico que ralentizan todo el proceso de entrenamiento.

CONTROL PID Y MODULACIÓN DEL CAUDAL

Para gestionar esta variabilidad, el corazón de la regulación se basa en algoritmos PID que actúan sobre los inversores de las bombas (VFD)

- **Gestión de la presión diferencial:** la CDU supervisa constantemente la diferencia de presión entre la impulsión y el retorno del circuito secundario, con el objetivo de mantener un deltaP constante en los racks, lo que permite al sistema responder de manera instantánea a la apertura o cierre de las válvulas locales en los nodos de servidores durante los picos de carga;
- **Modulación térmica:** al regular la velocidad de las bombas y la válvula PICV en el circuito primario, la CDU estabiliza la temperatura de impulsión en el valor objetivo, compensando las fluctuaciones rápidas del retorno provocadas por los ciclos de entrenamiento de la IA.

CONTROL Y GESTIÓN DEL PUNTO DE ROCÍO

Uno de los mayores riesgos en una sala de data center híbrida es la formación de condensación: por tal razón, la CDU integra sensores de humedad y temperatura ambiente, calculando en tiempo real el punto de rocío de la sala y asegurando que la temperatura del fluido de impulsión sea siempre superior en al menos 3-5 °C al punto de rocío.

6.3 Compliance servidor NVIDIA

Para un diseñador, el cumplimiento de los estándares de los fabricantes de chips es un requisito imprescindible para garantizar la fiabilidad de la inversión en TI. Las arquitecturas NVIDIA Blackwell (GB200) imponen parámetros severos para las CDU:

- **Filtración:** NVIDIA exige una filtración estricta para proteger los microcanales de las GPU. El equipamiento de nuestras máquinas con filtros de cartucho de 25 micras supera los estándares, lo que evita la erosión de los componentes internos;
- **Estabilidad del caudal:** La CDU debe gestionar variaciones repentinas sin oscilaciones de presión superiores al 5 %, una especificación crítica para los sistemas HGX/GB200;
- **Protocolos de comunicación:** compatibilidad nativa para Modbus TCP/IP, BACnet o SNMP, lo que permite una telemetría completa integrada en el sistema de gestión del clúster;
- **Redundancia:** sistema de bombeo redundante N+1 y controladores redundantes para cumplir con los requisitos de alta disponibilidad.

7 EFICIENCIA, SOSTENIBILIDAD Y RECUPERACIÓN DE CALOR

7.1 Más allá del PUE: la definición del ERF

La Power Usage Effectiveness (PUE) ha sido durante años el único indicador de referencia para medir la eficiencia de los data centers. Sin embargo, con la llegada de los data centers refrigerados por líquido, nos encontramos ante una situación caracterizada por una doble tendencia: el PUE tiende cada vez más a valores cercanos a la unidad, mientras que tanto las temperaturas como las potencias en juego en los data centers tienden a aumentar, por lo que la recuperación del calor generado se vuelve tan sencilla como necesaria. A estas alturas, el PUE por sí solo ya no basta para describir el impacto «real» de un data center, sino que debe ir acompañado de un KPI que pueda cuantificar su valor «circular», es decir, qué parte del calor producido se recupera y reutiliza: así llegamos a la definición del Factor de Reutilización de Energía (ERF, por sus siglas en inglés).

ERF = Factor de Reutilización de Energía / Energía total del data center

Mientras que el PUE se limita a medir cuánta energía se «desperdicia», el ERF mide cuánta energía se reintroduce en el sistema: el cambio de paradigma es claro, pasando del modelo «heat-as-a-waste» (calor como residuo) al de «heat-as-a-source» (calor como fuente de energía).

Por consiguiente, cuanto mayor sea la proporción de energía recuperada y reutilizada, menor será el valor del ERF.

7.2 Estrategias de recuperación de calor

En la Refrigeración Líquida, recuperar el calor generado por la carga informática es más sencillo que en la refrigeración por aire. Efectivamente, la temperatura de retorno del fluido secundario alcanza valores cercanos o incluso superiores a los 40 °C, lo que permite tanto su reutilización directa como su alimentación a una bomba de calor de muy alta temperatura.

DISTRICT HEATING

El circuito primario de la CDU se conecta a una bomba de calor de muy alta temperatura, que alimenta la red de calefacción urbana. Un clúster de IA de 10 MW puede calentar entre 2000 y 3000 viviendas modernas: en muchos países europeos, esto permite al data center obtener incentivos gubernamentales o reducir drásticamente los impuestos sobre las emisiones de CO₂.

PROCESOS INDUSTRIALES / AGRICULTURA 4.0

Además de la calefacción urbana, el calor a temperatura media constante las 24 horas del día, los 7 días de la semana, se presta a una multitud de otras aplicaciones:

- **Invernaderos hidropónicos:** mantenimiento de la temperatura ideal para cultivos intensivos, reduciendo los costes de calefacción;

- **Instalaciones de secado o precalentamiento en procesos industriales** que requieren agua caliente para las fases de lavado o preparación química;

- **Climatización de piscinas.**

OPTIMIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA LOCAL

A falta de redes externas, el calor puede utilizarse:

- para mejorar la eficiencia del mismo data center;
- para la calefacción de oficinas administrativas / almacenes;
- para precalentar el agua sanitaria (DHW) para los edificios adyacentes.

7.3 Marco normativo

La adopción de la refrigeración líquida y la implementación de estrategias para maximizar el ERF (**Factor de Reutilización de Energía**) son hoy día los pilares fundamentales para el cumplimiento de las nuevas directivas internacionales y para el acceso a los mercados de capitales.

LA DIRECTIVA EUROPEA EED

La revisión de la Directiva (UE) 2023/1791 (EED - Directiva sobre eficiencia energética) ha introducido obligaciones de información y transparencia sin precedentes para el sector:

- **Obligación de recuperación de calor:** el Reglamento Delegado (UE) 2024/1364 exige a los data centers con una potencia nominal superior a 1 MW que realicen análisis de coste-beneficio para el aprovechamiento del calor residual a través de redes de calefacción urbana u otras aplicaciones industriales, con un ERF mínimo de 0.20;

- **Base de datos europea:** a partir de 2024, los operadores de data centers de más de 500 kW estarán obligados a publicar anualmente sus KPI, incluidos el PUE, el WUE y el ERF, en la plataforma europea para el seguimiento de la eficiencia de los data centers;

- **Taxonomía de sostenibilidad de la UE:** la refrigeración líquida es una de las «tecnologías facilitadoras» que permiten respetar los umbrales de emisión establecidos para clasificar una inversión como «sostenible» según los criterios técnicos de la Taxonomía de la UE (Reglamento 2020/852).

DESCARBONIZACIÓN DE LAS EMISIONES DE ALCANCE 2 Y 3

La integración de sistemas Direct-to-Chip repercute directamente en la estrategia de descarbonización corporativa definida por el GHG Protocol (**Green House Gas Protocol**):

- **Reducción de las emisiones de Alcance 2 (emisiones indirectas relacionadas con la energía):** La eficiencia intrínseca del líquido reduce drásticamente la energía necesaria para la refrigeración (PUE inferior a 1.1), lo que disminuye las emisiones relacionadas con la adquisición de energía eléctrica;
- **Reducción de Alcance 3 (Cadena de Valor y Circularidad):** Desde la perspectiva de la Economía Circular, la integración de

sistemas de recuperación de calor permite que el data center pase de ser un gran consumidor de energía a un proveedor activo de energía térmica para la comunidad, generando las denominadas «emisiones evitadas» (Avoided Emissions). Aunque, según el Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (GHG Protocol), estas medidas no reducen matemáticamente las toneladas de CO₂ del Alcance 3 de la empresa, su inclusión en la CSRD (Directiva sobre la información corporativa en materia de sostenibilidad) pone de manifiesto un modelo de negocio regenerativo y de simbiosis industrial.

Este enfoque circular reduce los riesgos de transición normativa, mejora sensiblemente la calificación ESG y facilita el acceso a instrumentos de financiación subvencionada, como los Green Bonds (bonos verdes), convirtiendo la infraestructura en un activo prioritario para los inversores institucionales orientados a la sostenibilidad a largo plazo.

8 RETOS OPERATIVOS, MANTENIMIENTO Y SEGURIDAD

8.1 Gestión química y monitorización del PG25

La estabilidad química del PG25 es esencial para prevenir la corrosión galvánica y el «biofouling»: por lo tanto, es necesario realizar un muestreo, al menos semestral, del fluido del circuito secundario, con el fin de monitorizar:

- **Nivel de glicol:** para garantizar que la protección anticongelante y las propiedades térmicas se mantengan constantes;
- **Reserva de alcalinidad (pH):** una disminución del pH indica una oxidación del glicol, que puede volverse ácido y atacar los metales. El valor ideal del pH debe oscilar entre 8.0 y 9.5;
- **Concentración de inhibidores:** los pasivantes para cobre y acero deben ser activos.

Es importante ejecutar correctamente el rellenado del circuito secundario: cada reposición de fluido debe realizarse con una mezcla prediluida de grado industrial, por otra parte, la adición de agua corriente sin tratar comprometería la conductividad eléctrica y la pureza del circuito.

8.2 Mantenimiento ordinario de la CDU

La presencia de microcanales en las placas frías (con canales inferiores a 200 micras) hace que la filtración sea la operación de mantenimiento más crítica.

- **Filtros de cesta dúplex en la CDU:** el mantenimiento de los filtros de 25 micras se realiza mediante la monitorización de la presión diferencial. Un aumento del deltaP indica la obstrucción del cartucho. Gracias a la configuración dúplex, es posible realizar el mantenimiento en caliente del sistema, aislando los filtros de uno en uno mediante las llaves de paso, sin interrumpir el funcionamiento de la máquina;
- **Purga de aire:** el aire atrapado en el circuito puede causar erosión localizada, es por eso que es fundamental comprobar regularmente el funcionamiento correcto de las válvulas de purga automática.

8.3 Mantenimiento de los servidores

Un sistema Direct-to-Chip (DTC) moderno está diseñado para que su mantenimiento sea fácil y rápido, además de garantizar la continuidad operativa.

OPERACIONES DE HOT-SWAP (SUSTITUCIÓN EN CALIENTE)

La clave de la facilidad de mantenimiento reside en los conectores rápidos UQD (Universal Quick Disconnects). El diseño específico de estos conectores es intrínsecamente «antigoteo», lo que minimiza el riesgo de que el PG25 gotee sobre los servidores o, en

general, en la sala de datos (white space), y evita al mismo tiempo que se formen burbujas de aire en el circuito. Además, gracias a la modularidad de los racks y a los colectores equipados con válvulas de cierre para cada slot, es posible intervenir de forma selectiva aislando únicamente el servidor afectado por el mantenimiento, sin influir sobre el caudal ni la presión en los demás nodos.

PREVENCIÓN DE FUGAS

El mantenimiento preventivo incluye la inspección de los conductos hidráulicos en el interior del chasis y de las juntas, con el fin de prevenir cualquier posible fuga de fluido:

- **Detección de fugas:** los racks refrigerados por líquido incorporan sensores enrasados o puntuales situados en la parte inferior del chasis, que envían una señal de alarma y apagan el servidor en caso de valores anómalos de humedad;
- **Curvatura de los tubos:** durante el mantenimiento, es imprescindible verificar que los tubos flexibles internos (FEP/EPDM) no hayan sufrido torsiones o estrangulamientos que puedan aumentar la resistencia hidráulica local;
- **Juntas tóricas (O-ring) de los conectores rápidos:** las juntas tóricas deben inspeccionarse periódicamente. El uso de juntas de alta calidad reduce la necesidad de mantenimiento, pero los ciclos frecuentes de conexión y desconexión pueden requerir una ligera lubricación con productos compatibles con el PG25 para evitar desgarros en la goma que provocarían microfugas.

9 FRONTERAS FUTURAS: DATA CENTERS A 800 V

9.1 Situación actual: distribución a 400 V CA

Actualmente, en los data centers la distribución se realiza a 400 V CA en la sala y a 48 V CC a nivel del rack. Sin embargo, la llegada de los clústeres de IA con densidades superiores a 150 kW/rack somete a la arquitectura actual basada en barras colectoras (barras de cobre) a 48 V a un gran estrés desde el punto de vista electro-mecánico.

Si tomamos como referencia un rack de 100 kW, las barras colectoras de 48 V requieren una intensidad de corriente superior a 2000 A. Para gestionar tales valores de intensidad de corriente, es necesario utilizar múltiples barras colectoras en paralelo o una única barra colectora de mayor sección: esto conlleva, en ambos casos, costes elevados, dimensiones considerables y una mayor complejidad de cableado.

Además, hay que tener en cuenta que las pérdidas por efecto Joule a lo largo de las líneas de distribución en el interior del rack, que generan una carga térmica «parásita» adicional, crecen de forma cuadrática al aumentar la corriente: por lo tanto, elevar la tensión permite minimizarlas.

9.2 La distribución a 800 V CC

Tomada de la ingeniería de los vehículos eléctricos (VE) de alto rendimiento, la distribución a 800 V en corriente continua se está imponiendo como la solución definitiva para los data centers de nueva generación. Las ventajas son múltiples:

- **Reducción de las secciones de las barras colectoras:** con una tensión de 800 V en lugar de 48 V, la corriente necesaria para alimentar un rack de 100 kW se reduce a unos 120 A. Esto permite utilizar conductores ligeros y flexibles, optimizando el espacio interior del chasis y facilitando las operaciones de mantenimiento;
- **Eficiencia de transporte:** puesto que las pérdidas en una línea disminuyen con el cuadrado de la tensión, el paso de 400 V a 800 V aumenta la eficiencia de la distribución eléctrica por encima del 99 %, reduciendo drásticamente el calor generado por los cables;
- **Simplificación de la cadena de conversión:** la arquitectura HV-DC (corriente continua de alta tensión) elimina las etapas intermedias de rectificación y transformación CA/CC. Un menor número de etapas de conversión implica menos componentes susceptibles de averiarse y una menor cantidad total de calor que disipar.

9.3 Fuentes de alimentación (PSU) refrigeradas por líquido

La extrema densidad de potencia de las nuevas fuentes de alimentación (Power Supply Units - PSU) a 800 V deja obsoleta la ventilación forzada. Por lo tanto, las PSU de nueva generación integran

placas frías para refrigeración conectadas directamente al circuito secundario gestionado por la CDU: la refrigeración líquida ya no es un privilegio exclusivo de las CPU y GPU, sino que se extiende a casi todos los componentes del rack. Este cambio eleva el porcentaje de carga disipada por el líquido a valores de entre el 95 % y el 98 %, lo que reduce drásticamente la necesidad de refrigeración por aire.

9.4 Retos de los 800 V: seguridad y gestión ambiental

El funcionamiento a 800 V CC introduce requisitos de seguridad severos:

- **Prevención de arco eléctrico:** a tensiones de este tipo, las averías pueden provocar arcos eléctricos persistentes. Es fundamental utilizar conectores con enclavamientos de seguridad y sistemas de protección ultrarrápidos que puedan aislar la avería en milisegundos;
- **Prevención de la condensación:** la proximidad entre los conductores de 800 V y los circuitos de líquido requiere un control impecable del punto de rocío. La CDU actúa como garante de la seguridad: al modular la temperatura de impulsión para evitar la condensación, previene el riesgo de cortocircuitos catastróficos en entornos HVDC.

10 CONCLUSIONES

En 2026, podemos afirmar con certeza que la refrigeración líquida ha salido definitivamente del nicho del HPC para convertirse en el único paradigma técnico e infraestructural que puede sostener la revolución de la IA.

Al utilizar procesadores que han superado hace tiempo el umbral «crítico» de los 1000 W, el aire ya no es un método viable para la refrigeración de los data centers: la transición hacia la refrigeración líquida ya no es una simple opción, sino un imperativo.

Esta revolución también marca la entrada de la sostenibilidad entre los KPI de los data centers: la recuperación de calor se convierte tanto en una obligación normativa como en un apalancamiento financiero, cambiando el paradigma de «heat-as-waste» a «heat-as-source».

De esta manera, el data center pasa de ser un «búnker aislado» a convertirse en un auténtico «ecosistema energético urbano», silencioso e integrado, que puede dar calor a comunidades enteras.

11 APÉNDICE A

11.1 Gestión química del fluido y compatibilidad de los materiales

ESPECIFICACIONES DEL AGUA DE LLENADO

Antes de mezclarla con propilenglicol, el agua utilizada debe cumplir requisitos de pureza extremadamente elevados. Está terminantemente prohibido utilizar el agua corriente, incluso cuando es descalcificada, debido a la presencia de cloruros y sulfatos.

Propiedades típicas de los fluidos termovectores PG 25 y PG 55:

Característica	Rendimiento
Aspecto	Claro y libre de partículas
pH del fluido	8,0 – 10,5 El pH del fluido depende de la formulación de los inhibidores de corrosión y puede ser más bajo cuando se utiliza tecnología de ácidos orgánicos (OAT)
Alcalinidad residual no corregida	4 mL, referido al fluido diluido Medida de la capacidad tampón del fluido
Cobre	<2 ppm
Hierro	<2 ppm
Dureza total	<20 ppm Valores elevados de dureza indican el uso de agua de baja calidad
Cloruros	<5 ppm Valores elevados de cloruros indican el uso de agua de baja calidad
Sulfatos	<10 ppm Valores elevados de sulfatos indican el uso de agua de baja calidad

CARACTERÍSTICAS DEL PG25

El fluido operativo debe ser una mezcla de propilenglicol de grado industrial con un conjunto de inhibidores de corrosión multimetal preformulado.

Funciones de los inhibidores:

- Pasivantes de Cobre (azoles):** crean una película monomolecular sobre las superficies de cobre de las placas frías para prevenir la oxidación y la disolución iónica;
- Tampones de pH (Buffer):** Mantienen el fluido en un entorno alcalino (pH entre 8.5 y 10.5) para neutralizar los productos ácidos derivados de la degradación natural del glicol con el tiempo;
- Inhibidores para acero/acero inoxidable:** protegen los colectores y los componentes de la CDU contra la corrosión por picaduras (pitting).

Riesgos de degradación (glucólisis)

Si se expone a altas temperaturas y al oxígeno, el propilenglicol puede degradarse en ácidos orgánicos (ácido glicólico, ácido fórmico). Esto reduce el pH y convierte el fluido en un agente corrosivo. La

monitorización de la reserva de alcalinidad es la única forma de prever este fenómeno.

COMPATIBILIDAD DE LOS MATERIALES

Para garantizar una vida útil de 20 años, el circuito secundario debe cumplir estrictos requisitos relativos a la compatibilidad galvánica: la interacción entre metales con potenciales electroquímicos dis-tantes es la causa principal de fallos en los sistemas liquid-to-chip.

Materiales aprobados:

- **Metales y aleaciones metálicas:** Cobre, Latón con <15% de zinc, Acero inoxidable, Níquel, aleaciones con alto contenido de níquel, Cromo, Titanio, B-Ni-6, BCuP-2, BCuP-3, BCuP-4, BCuP-5, TF-H60F;
- **Elastómeros, plásticos y otros materiales:** EPDM, Viton A, Viton GF, Viton ETP, FEP, PTFE, PP, HDPE, PEEK, Loctite 567.

Materiales prohibidos:

- **Aluminio (también anodizado):** muy sensible a la corrosión galvánica en presencia de cobre;
- **Acero galvanizado:** el zinc reacciona con los inhibidores de glicol, creando lodos y sedimentos sólidos;
- **Soldaduras de estaño/plomo:** pueden ser atacadas químicamente por los inhibidores del glicol;
- **EPDM sulfonado:** puede liberar compuestos que atacan al cobre.

12 APÉNDICE B

12.1 Protocolo operativo de puesta en servicio y pruebas

El presente protocolo define los procedimientos estándares para las pruebas y la puesta en servicio (T&C) de las Unidades de Distribución de Refrigerante y de la infraestructura hidráulica asociada. Los objetivos son la validación de la integridad mecánica y de la respuesta dinámica de los sistemas de control antes de la integración de la carga informática, así como la limpieza general del circuito.

FASE 1: PRUEBA NEUMÁTICA DEL CIRCUITO

Antes de llenar el circuito secundario con PG25, el sistema debe someterse a una prueba de presión para detectar posibles fugas.

- **Procedimiento:** aislar la CDU de los racks mediante las válvulas de cierre; - Presurizar el circuito secundario con Nitrógeno anhidro a una presión equivalente a 1.5 veces la presión operativa de diseño (normalmente entre 6 y 8 bar);
- **Duración: 24 horas;**
- **Criterio de aceptación:** caída de presión <1 % tras la compensación de la temperatura ambiente.

Nota: es obligatorio utilizar nitrógeno en lugar de aire comprimido para evitar la introducción de humedad y contaminantes oleosos en el circuito.

FASE 2: LAVADO (FLUSHING) Y PASIVACIÓN

El flushing (lavado) del circuito es una operación fundamental: si no se eliminan correctamente del circuito, los residuos de soldadura, las virutas metálicas y los aceites de mecanizado pueden destruir las placas frías en muy poco tiempo. Protocolo de lavado en circuito cerrado:

1. **Derivación de los servidores:** asegurarse de que todos los racks/servidores estén excluidos del circuito. El fluido de lavado nunca debe atravesar las placas frías durante esta fase;
2. **Solución limpiadora:** utilizar agua desmineralizada con un aditivo detergente dispersante específico para circuitos multimedios;
3. **Velocidad de lavado:** las bombas de la CDU deben funcionar a la frecuencia máxima para garantizar una velocidad del fluido de al menos 1.5 m/s, necesaria para arrastrar los residuos pesados hacia los filtros de la CDU;
4. **Inspección de los filtros:** supervisar el deltaP en los filtros de cesta. Limpiar los cartuchos cada 2 horas aproximadamente hasta que ya no se detecte acumulación de residuos;
5. **Pasivación:** tras el lavado, es necesario aplicar un agente pasivante que cree una película protectora sobre las superficies internas de cobre y acero inoxidable, previniendo la oxidación inmediata antes del llenado final con PG25.

FASE 3: LLENADO DEFINITIVO Y PURGA DE AIRE

Al llenar con el fluido operativo (PG25) debe evitarse la cavitación de las bombas.

- **Procedimiento de llenado:** utilizar la bomba auxiliar (make-up pump) para cargar el sistema desde el punto más bajo. La CDU debe estar equipada con una conector de carga para la bomba auxiliar; prever la bomba directamente en su interior.
- **Ciclo de purga de aire:** activar las bombas de la CDU a velocidad variable (ciclos 20%-80%-20%) para facilitar la separación de las burbujas de aire de las paredes de las tuberías.
- **Supervisión de los purgadores:** comprobar manualmente cada válvula de purga en los puntos altos del colector del rack. Un sistema correctamente purgado deberá ser acústicamente «silencioso».

FASE 4: VALIDACIÓN DE LAS LÓGICAS DE CONTROL

Prueba del ciclo PID

- **Procedimiento:** simular la variación de la carga informática abriendo y cerrando las válvulas de cierre de diferentes racks.
- **Comprobación:** la CDU debe modular la velocidad de las bombas para mantener el deltaP en el set point programado con un error máximo del 5 %.

Prueba de control del punto de rocío

- **Procedimiento:** Utilizar un generador de vapor portátil cerca de los sensores higrométricos de la CDU para elevar artificialmente la humedad detectada.
- **Respuesta esperada:** La CDU debe forzar la apertura de la válvula mezcladora del circuito primario para elevar la temperatura de impulsión por encima del punto de rocío calculado, activando simultáneamente la alarma visual/remota.

Conmutación por fallo de las bombas

- **Procedimiento:** Simular un fallo eléctrico en la bomba 1 (disparo del interruptor magnetotérmico).
- **Verificación:** La Bomba 2 (en espera) debe arrancar en 5 segundos, garantizando la continuidad del caudal sin que la temperatura de impulsión supere el umbral de alarma crítica.

FASE 5: PRUEBA DE ACEPTACIÓN IN SITU (SAT) Y ENTREGA

La última fase prevé la firma de los documentos de prueba y la entrega de la telemetría.

- **Integración BMS:** Comprobar que todos los puntos Modbus/BACnet sean legibles por el sistema de gestión central del data center.
- **Verificación de los caudales nominales:** medición con caudalímetro ultrasónico externo en cada toma del rack para confirmar que la distribución hidráulica esté equilibrada.

- **Documentación final:** entrega del «As-Built» hidráulico, de los registros de análisis químico inicial del fluido y del certificado de calibración de los sensores



Viale Spagna, 31/33 - 35020 Tribano (Padova) - Italia
Tel. +39 049 9588511 - Fax +39 049 9588522
IT02191431200
info@hiref.it - www.hiref.it

  /HiRef S.p.A.