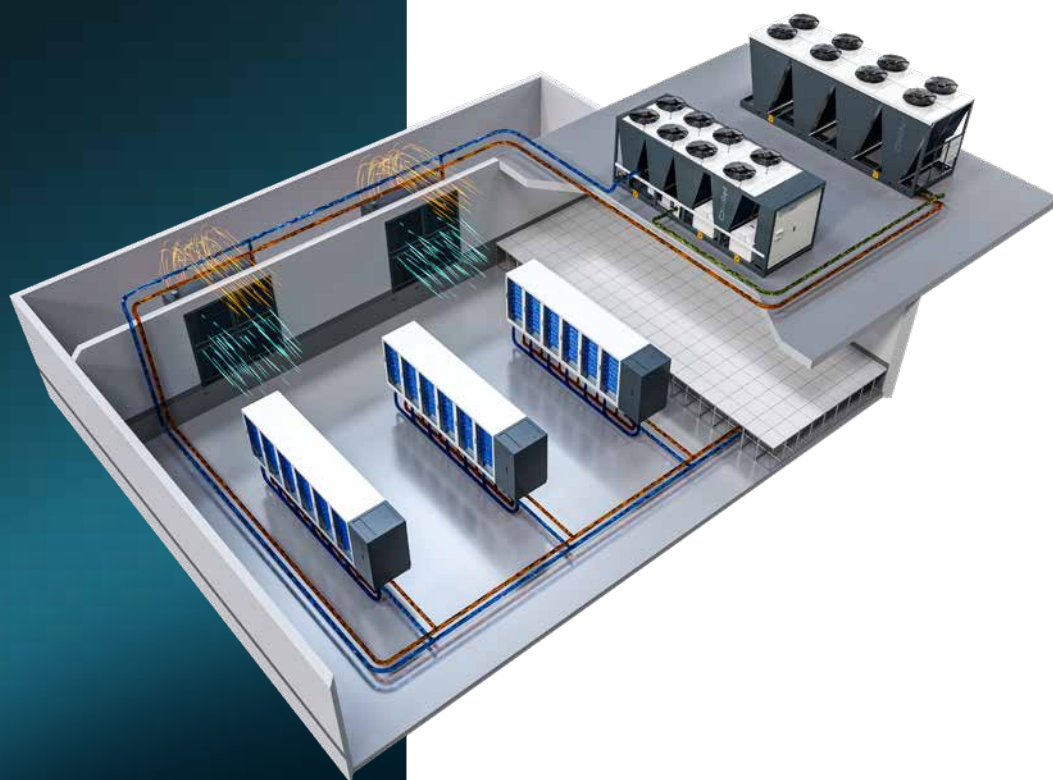




WHITE PAPER

Liquid cooling

L'IMPERATIVO DEL 2026



INDICE

1	INTRODUZIONE	p. 4	9.4	SFIDE DEGLI 800V: SICUREZZA E GESTIONE AMBIENTALE.....	p. 21
2	L'EVOLUZIONE DEL CARICO NEI DATA CENTER	p. 5	10	CONCLUSIONI	p. 22
2.1	DALLA "DENSITY ERA" ALLA "POWER ERA"	p. 5	11	APPENDICE A	p. 23
2.2	L'EVOLUZIONE DEL TDP NEI PROCESSORI NVIDIA.....	p. 5	11.1	GESTIONE CHIMICA DEL FLUIDO E COMPATIBILITÀ DEI MATERIALI	p. 23
2.3	IL LIMITE FISICO DELL'ARIA: IL "THERMAL WALL"	p. 5	12	APPENDICE B	p. 24
2.4	CONCLUSIONE	p. 5	12.1	PROTOCOLLO OPERATIVO DI COMMISSIONING E COLLAUDO	p. 24
3	TERMODINAMICA DEL RAFFREDDAMENTO A LIQUIDO	p. 6			
3.1	ARIA VS LIQUIDO	p. 6			
3.2	CONDUZIONE E CONVEZIONE.....	p. 6			
3.3	IL RUOLO DEL PG25 NEL DIRECT-TO-CHIP.....	p. 6			
3.4	FLUIDI PER DIRECT-TO-CHIP BIFASE E IMMERSION COOLING	p. 6			
4	TECNOLOGIE DI RAFFREDDAMENTO	p. 7			
4.1	DIRECT-TO-CHIP (DTC) MONOFASE.....	p. 7			
4.2	DIRECT-TO-CHIP (DTC) BIFASE	p. 8			
4.3	IMMERSION COOLING (IC) MONOFASE	p. 9			
4.4	IMMERSION COOLING (IC) BIFASE	p. 10			
5	ECOSISTEMA DEL LIQUID COOLING	p. 11			
5.1	ARCHITETTURE DI SALA IBRIDE.....	p. 11			
5.2	L'ECOSISTEMA COMPLETO DEL LIQUID COOLING	p. 14			
5.3	LA DISTRIBUZIONE DEL LIQUIDO IN SALA.....	p. 14			
6	COOLANT DISTRIBUTION UNIT	p. 16			
6.1	COMPONENTI DELLA CDU.....	p. 16			
6.2	LOGICHE DI REGOLAZIONE.....	p. 17			
6.3	COMPLIANCE SERVER NVIDIA	p. 17			
7	EFFICIENZA, SOSTENIBILITÀ E RECUPERO DEL CALORE	p. 18			
7.1	OLTRE IL PUE: LA DEFINIZIONE DELL'ERF	p. 18			
7.2	STRATEGIE DI RECUPERO DEL CALORE.....	p. 18			
7.3	QUADRO NORMATIVO.....	p. 18			
8	SFIDE OPERATIVE, MANUTENZIONE E SICUREZZA	p. 20			
8.1	GESTIONE CHIMICA E MONITORAGGIO DEL PG25	p. 20			
8.2	MANUTENZIONE ORDINARIA DELLA CDU	p. 20			
8.3	MANUTENZIONE DEI SERVER	p. 20			
9	FRONTIERE FUTURE – DATA CENTER A 800V	p. 21			
9.1	LO STATO ATTUALE: DISTRIBUZIONE A 400V AC	p. 21			
9.2	LA DISTRIBUZIONE A 800V DC	p. 21			
9.3	PSU LIQUID-COOLED	p. 21			

1 INTRODUZIONE

Il mondo data center sta attraversando la trasformazione più netta degli ultimi trent'anni. Per decenni, le sale server sono state progettate e realizzate secondo l'approccio air-first: pavimenti flottanti, controsoffitti e compartimentazione dei corridoi hanno consentito di ottimizzare il raffreddamento ad aria e di sfruttarne al massimo le potenzialità. Tuttavia, l'avvento dell'Intelligenza Artificiale Generativa e del calcolo ad alte prestazioni (HPC) hanno introdotto carichi termici che superano i limiti fisici della convezione forzata ad aria, portando il mondo data center ad un vero e proprio breaking point.

Nel 2026, con i processori che hanno superato abbondantemente la soglia dei 100W di TDP (Thermal Design Power), la questione non è più "se" adottare il raffreddamento a liquido, ma piuttosto "come" implementarlo in maniera semplice, scalabile e integrata con l'infrastruttura esistente.

Questo White Paper si propone di guidare i professionisti del settore attraverso la transizione dal raffreddamento ad aria a quello a liquido, in un cambiamento che oltre al mezzo fisico di rimozione del calore si riflette anche sull'intero ecosistema di sala: da collettori e tubazioni, agli innesti rapidi, fino alla regolazione di pressione e temperatura nei circuiti.

KEY POINTS

- **Superamento della "Thermal Wall":** analisi delle ragioni per cui le infrastrutture tradizionali basate su sistemi CRAC/CRAH non risultano più tecnicamente sostenibili per densità superiori a 40 kW per rack;
- **Tecnologie di raffreddamento a liquido:** approfondimento tecnico delle soluzioni Direct-to-Chip e dei sistemi a immersione, con valutazione delle architetture, dei principi di funzionamento e degli scenari applicativi;
- **Coolant Distribution Unit (CDU):** disamina dei componenti chiave, del principio operativo e delle logiche di regolazione e controllo che governano la distribuzione del fluido refrigerante;
- **Sostenibilità misurabile:** valutazione dell'impatto del liquid cooling sulla riduzione del PUE, con valori prossimi a 1,1, e sulle opportunità di recupero del calore per applicazioni di teleriscaldamento.

2 L'EVOLUZIONE DEL CARICO NEI DATA CENTER

2.1 Dalla "Density Era" alla "Power Era"

Storicamente, la progettazione dei data center è stata guidata dall'ottimizzazione dei flussi d'aria: nel decennio scorso i racks da 5kW sono stati sostituiti gradualmente da soluzioni sempre più performanti, fino ad arrivare ai 15 kW/rack. Questa transizione è stata resa possibile massimizzando le potenzialità del raffreddamento ad aria, con l'avvento delle compartimentazioni per i corridoi caldo/freddo e l'innalzamento dei pavimenti flottanti per diminuire le perdite di carico e creare un "polmone" di pressione statica uniforme al servizio della sala.

Tuttavia, tra il 2019 e il 2020, l'avvento dell'High Performance Computing (HPC) ha portato ad un graduale, ma irreversibile, cambiamento nelle regole del gioco: i server HPC hanno aumentato la densità a tal punto da arrivare alla soglia dei 40kW/rack. Con carichi del genere, l'aria smette di essere una soluzione efficiente per il raffreddamento, poiché le velocità necessarie per asportare calore dai server genererebbero turbolenze tali da rendere il processo inefficiente.

Ad oggi abbiamo superato i 100kW/rack e ci stiamo preparando a raggiungere i 200kW/rack: il raffreddamento ad aria, nella sua accezione tradizionale, non è più un'opzione valida.

2.2 L'evoluzione del TDP nei processori NVIDIA

Il driver principale di questa accelerazione è l'evoluzione del Thermal Design Power (TDP).

Non più di 10 anni fa, una CPU di fascia alta operava nell'intervallo 150-200W. Oggi la situazione è cambiata radicalmente:

- **NVIDIA V100/A100:** 300/400W per modulo. Ha segnato il primo vero sbarco dei 40 kW/rack nel settore commerciale;
- **NVIDIA H100 (Hopper):** TDP fino a 700W per modulo;
- **NVIDIA B200 (Blackwell):** TDP che raggiunge i 1000W - 1200W per singola GPU.

Quando 8 di queste GPU vengono integrate in un singolo nodo server (HGX), il calore generato in poche unità rack è paragonabile a quello di un intero filare di data center di dieci anni fa. Dissipare 10 kW da un singolo server 4U tramite ventole richiederebbe flussi d'aria e velocità di rotazione tali da generare vibrazioni dannose per i componenti e sound power level superiori ai 100 dB(A).

Generazione	Anno	TDP Max	Sistema di Raffreddamento Consigliato
P100 (Pascal)	2016	300W	Raffreddamento ad aria (tradizionale)
V100 (Volta)	2017	300W	Raffreddamento ad aria (tradizionale)
A100 (Ampere)	2020	400W - 500W	Raffreddamento ad aria (rear-door)
H100 (Hopper)	2023	700W	Direct-to-Chip Liquid Cooling
B200 (Blackwell)	2025	1000W - 1200W	Direct-to-Chip Liquid Cooling

2.3 Il limite fisico dell'aria: Il "Thermal Wall"

Il concetto di "Thermal Wall" si manifesta quando il costo energetico e lo spazio necessario per muovere l'aria superano il beneficio del raffreddamento stesso. Sono tre i fattori che rendono il raffreddamento ad aria obsoleto per i carichi AI:

- **Capacità termica:** l'acqua ha una capacità termica volumetrica circa 3400 volte superiore all'aria, pertanto per dissipare anche una grande quantità di calore in un server è sufficiente la portata che scorre in un tubo del diametro di pochi millimetri;
- **Approccio:** per raffreddare chip da 1000W con l'aria, sarebbero necessarie temperature di mandata molto basse (18-20°C), riducendo al minimo la possibilità di sfruttare il free-cooling. Il liquido permette invece di lavorare con un approccio più ridotto, e di conseguenza temperature di mandata più alte;
- **Consumi delle ventole:** la potenza assorbita dalle ventole cresce in modo cubico rispetto alla portata: in rack ad alta densità raffreddati ad aria (40 kW/rack), le ventole possono consumare fino al 20% della potenza totale del server.

2.4 Conclusione

Dal punto di vista progettuale, il superamento dei 40/kW per rack rende l'aria un mezzo obsoleto: la transizione verso il raffreddamento a liquido diventa obbligatoria.

3 TERMODINAMICA DEL RAFFREDDAMENTO A LIQUIDO

3.1 Aria vs Liquido

La superiorità del raffreddamento a liquido rispetto a quello ad aria non è quantitativa, ma qualitativa.

Dal punto di vista termodinamico, il parametro più significativo per l'efficienza nella trasmissione del calore è la **Capacità Termica Volumetrica [kJ/m³K]**. Quella dell'acqua è oltre **3600 volte superiore** a quella dell'aria: pertanto, a parità di calore trasportato, la portata di liquido necessaria sarà molto minore rispetto a quella dell'aria.

Per comprendere l'impatto spaziale di questo concetto, analizziamo il fabbisogno per asportare **100 kW**, con un deltaT di 10°C, su un singolo rack:

- **Raffreddamento ad aria:** sarebbe necessaria una portata di circa 30.000 m³/h, che, ovviamente, è impossibile da implementare nella pratica;
- **Raffreddamento a liquido (PG25):** sono necessari circa 9 m³/h, ossia 2.5 l/s. Questa portata è gestibile con tubazioni di pochi centimetri di diametro, riducendo drasticamente l'ingombro infrastrutturale.

3.2 Conduzione e Convezione

Il raffreddamento ad aria tradizionale si affida alla convezione forzata, un processo limitato dalla bassissima conducibilità termica dell'aria, che di fatto agisce come un isolante naturale. Nel liquid cooling, e specificamente nei sistemi Direct-to-Chip (DTC), il calore viene rimosso tramite Cold Plates in rame. Questo approccio permette di:

- **Minimizzare la resistenza termica:** il calore passa dal die del processore al fluido attraverso un percorso metallico ad alta conducibilità, riducendo al minimo i gradienti termici;
- **Abilitare il "Warm Water Cooling":** grazie all'efficienza del liquido, è possibile operare con temperature di mandata elevate (35°C - 45°C) mantenendo comunque i processori entro i limiti operativi. Questo rende possibile l'utilizzo del free cooling in zone dove storicamente non era possibile, eliminando la dipendenza dai chiller e abbattendo drasticamente il PUE (Power Usage Effectiveness).

3.3 Il ruolo del PG25 nel Direct-to-Chip

Sebbene l'acqua pura sia un ottimo fluido vettore, il suo impiego in un data center è sconsigliato per rischi di corrosione, crescita biologica e congelamento. Lo standard industriale per il DTC si è consolidato attorno al PG25 (miscela al 25% di Glicole Propilenico e 75% di acqua demineralizzata con inibitori).

Il PG25 rappresenta il compromesso ingegneristico ideale:

1. **Protezione dalla corrosione:** gli inibitori chimici proteggono i loop secondari composti da metalli diversi (rame, acciaio inox), andando a prevenire la corrosione galvanica;
2. **Controllo biologico:** il glicole propilenico agisce come inibitore naturale, prevenendo la formazione di alghe e biofilm che potrebbero ostruire i micro-canali delle cold plates, le cui alette sono spesso larghe meno di 200 micron;
3. **Sicurezza:** a differenza del glicole etilenico, il glicole propilenico è classificato come a bassa tossicità, rendendolo sicuro per l'impiego in ambienti indoor con presenza di personale;
4. **Prestazioni:** sebbene l'aggiunta di glicole aumenti leggermente la viscosità, le prestazioni termiche non si discostano molto da quelle dell'acqua pura.

Proprietà	Aria	Acqua (Tecnica)	PG25 (Acqua/Glicole)	Rapporto (PG25/Aria)
Densità [kg/m ³]	1.149	994,4	1017,5	~885x
Calore Specifico [kJ/kg·K]	1.006	4.179	3.960	~3.93x
Conducibilità Termica [W/m·K]	0.026	0.621	0.493	~18,96x
Capacità Termica Volumetrica [kJ/m ³ ·K]	1.1156	4155,6	4029,3	~3611x

Note: proprietà calcolate a 34°C

3.4 Fluidi per direct-to-chip bifase e immersion cooling

A differenza del DTC monofase, le tecnologie a immersione (Immersion cooling) e il DTC bifase richiedono l'utilizzo esclusivo di fluidi dielettrici (oli sintetici o idrocarburi fluorurati) per garantire l'isolamento elettrico dei componenti.

Sebbene nell'immersion cooling monofase si debba scendere ad un compromesso termodinamico, con i fluidi dielettrici che hanno calore specifico e conducibilità inferiori del 50% rispetto al PG25, il DTC e l'IC bifase ribattono questo limite sfruttando il calore latente di evaporazione: in questi sistemi vengono utilizzati fluidi come idrofluoroolefine (HFO) o i chetoni fluorurati che evaporano a temperature controllate (nel range 30-60°C).

Tuttavia, la scelta del fluido è oggi strettamente vincolata alla sostenibilità: l'industria sta abbandonando i perfluorocarburi (PFC) e gli idrofluorocarburi (HFC) a causa di un GWP (Global Warming Potential) proibitivo, spesso superiore a 1000, e delle crescenti restrizioni sui PFAS ("Forever Chemicals"). Il passaggio a fluidi di nuova generazione con GWP < 1 è dunque diventato un requisito essenziale per la conformità ESG, garantendo che l'elevata densità di calcolo non si traduca in un rischio normativo o in un impatto atmosferico insostenibile.

4 TECNOLOGIE DI RAFFREDDAMENTO

4.1 Direct-to-chip (DTC) monofase

Il Direct-to chip (DTC) monofase rappresenta l'attuale standard industriale per l'AI e l'HPC.

Il calore viene rimosso tramite una piastra (Cold Plate) in rame con micro-canali interni, montata direttamente sul processore (CPU/GPU) con un materiale di interfaccia termica. Questa tecnologia prevede l'uso del PG25, che rimane sempre allo stato liquido.

PLUS:

- **Efficienza mirata:** asporta approssimativamente 85% del calore del nodo agendo direttamente sui componenti più energivori;
- **Versatilità:** consente configurazioni "ibride", dove il liquido raffredda i processori e un flusso d'aria ridotto gestisce i componenti secondari (RAM, VRM, Storage);
- **Retrofit:** è la soluzione più semplice da integrare in data center esistenti con layout a rack standard da 19".

MINUS:

- **Gestione Perdite:** richiede l'uso di innesti rapidi antigoccia (Quick Disconnects - QD) di alta qualità e sensori di rilevamento perdite all'interno dello chassis;
- **Complessità di Cablaggio:** l'aggiunta di manifold e tubazioni all'interno del server riduce lo spazio per la manutenzione fisica dei componenti.

4.2 Direct-to-chip (DTC) bifase

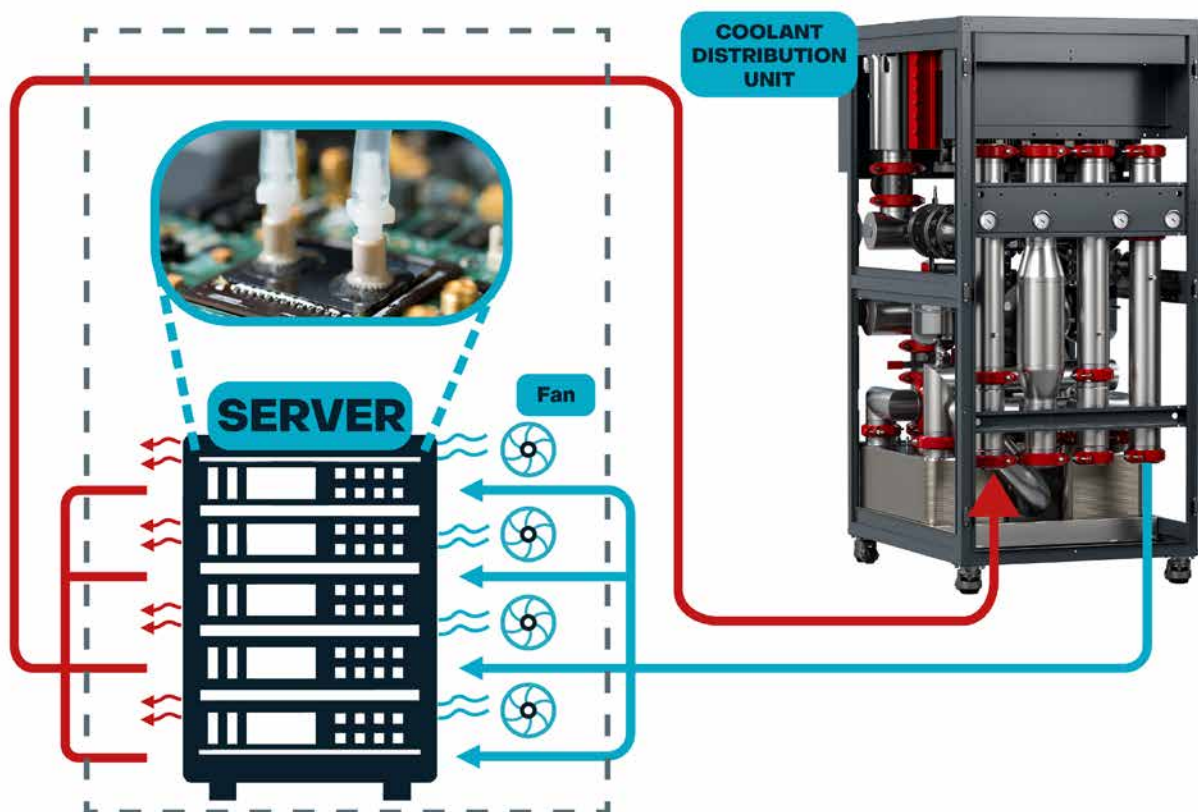
Nel DTC bifase, il fluido all'interno della cold plate cambia stato, passando da liquido a vapore. Sfrutta il calore latente di evaporazione per assorbire energia senza aumentare la temperatura del fluido.

PLUS:

- **Elevata capacità termica:** ideale per chip di prossima generazione che andranno a superare i 1000-1500W, dove il flusso monofase richiederebbe portate eccessive;
- **Uniformità Termica:** garantisce che l'intero chip sia alla stessa temperatura (la temperatura di saturazione del liquido), eliminando pericolosi gradienti termici.

MINUS:

- **Controllo della pressione:** richiede sistemi a tenuta stagna assoluta e valvole di controllo della pressione estremamente precise per gestire il vapore;
- **Costi:** l'uso di fluidi refrigeranti speciali e la progettazione dei condotti per gestire il ritorno del vapore aumentano drasticamente il CAPEX;
- **Fluido:** molte delle opzioni presenti sul mercato presentano un GWP elevato.



4.3 Immersion cooling (IC) monofase

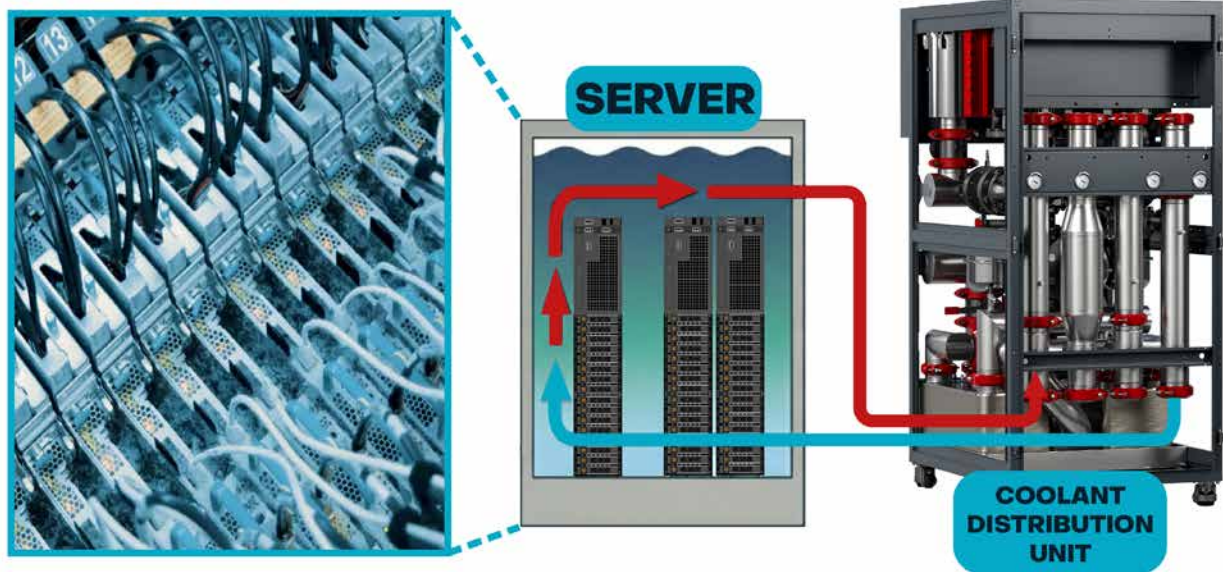
L'intero server viene immerso in una vasca contenente un fluido dielettrico che viene fatto circolare forzatamente verso uno scambiatore esterno. In questa configurazione dell'IC, il fluido rimane sempre allo stato liquido.

PLUS:

- **Raffreddamento 100% a liquido:** L'IC bifase dissipa il 100% del calore del server, inclusi alimentatori e networking, azzerando la necessità di raffreddamento ad aria, ed eliminando di conseguenza ventole e rumore;
- **Protezione dell'hardware:** Il fluido dielettrico protegge l'elettronica da ossidazione, umidità e polvere, riducendo i tassi di guasto dei PCB.

MINUS:

- **Manutenzione:** Estrarre un server richiede procedure di sgocciolamento e pulizia complesse;
- **Peso/layout:** Richiede pavimenti con portata di carico molto elevata e una revisione totale del layout della sala, con vasche orizzontali anziché rack verticali.



4.4 Immersion cooling (IC) bifase

In questa configurazione, il fluido dielettrico bolle a contatto con i componenti. Il vapore sale verso la sommità della vasca dove condensa su una serpentina raffreddata ad acqua e ricade per gravità.

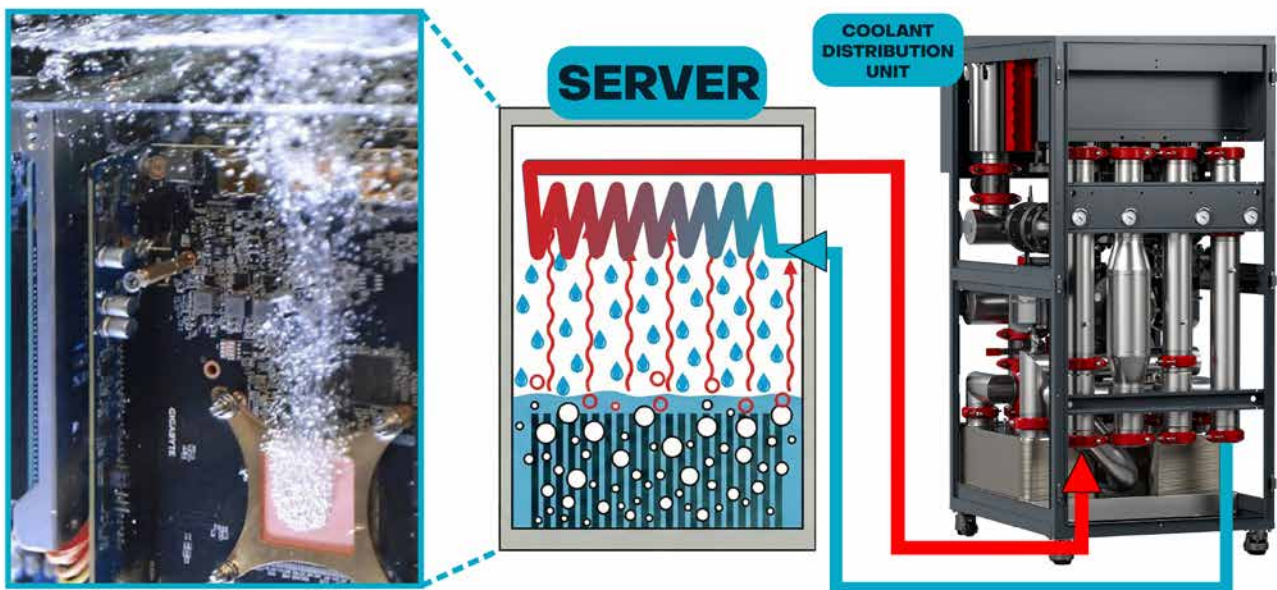
PLUS:

- **Efficienza:** permette di raggiungere PUE molto bassi (fino a 1.02), operando con acqua di raffreddamento nel circuito primario a temperature molto elevate;
- **Zero pompe nel circuito secondario:** il movimento del fluido è guidato dalla termodinamica.

MINUS:

- **Costo del fluido:** i fluidi dielettrici per cambio di fase sono estremamente costosi e soggetti a normative ambientali rigorose;
- **Manutenzione:** estrarre un server richiede procedure di sgocciolamento e pulizia complesse;
- **Peso/layout:** richiede pavimenti con portata di carico molto elevata e una revisione totale del layout della sala, con vasche orizzontali anziché rack verticali;
- **Fluido:** molte delle opzioni presenti sul mercato presentano un GWP elevato.

Tecnologia	Densità Supportata	Complessità Manutenzione	Integrazione	Target Applicativo
DTC Monofase	40 - 120 kW	Media	Buona (Ibrida)	AI Training / HPC Standard
DTC Bifase	100 - 200 kW	Alta	Limitata	Chip > 1500 W
Immersion Monofase / Bifase	100 - 300+ kW	Alta	Complessa	Supercomputing



5 ECOSISTEMA DEL LIQUID COOLING

5.1 Architetture di sala ibride

Nonostante l'efficienza dei cold plates, il raffreddamento Direct-to-Chip (DTC) agisce in modo mirato solo sui componenti ad alta densità termica (CPU, GPU, VRM, RAM). Tuttavia, all'interno di un server è presente una moltitudine di altri componenti – induttori, condensatori, chipset della scheda madre, unità di storage e alimentatori (PSU) – che continuano a dissipare calore nell'aria interna allo chassis. Tipicamente, il raffreddamento a liquido in un sistema DTC riesce ad asportare tra il 80% e l'85% del carico termico totale del rack. La quota parte restante viene dissipata in aria: pertanto, il data center del 2026 non è "solo liquido", ma ibrido.

È importante sottolineare come nelle sale con sistemi ad immersione, dove i server sono raffreddati al 100% a liquido, resti importante prevedere un adeguato controllo e climatizzazione dell'aria in sala. Questo si rende necessario, infatti, per dissipare il carico termico dovuto a operatori, luci, etc, oltre che per mantenere le condizioni termoigrometriche in una zona di comfort per gli operatori stessi.

5.1.1 CDU + Rear Door Heat Exchangers (RDHx)

Il RDHx è sostanzialmente un radiatore a liquido montato sulla porta posteriore del rack. Non è una tecnologia DTC in senso proprio, ma agisce come un "filtro termico" che neutralizza il calore prodotto dai server prima che esca dal rack.

Questa è considerata l'architettura ibrida "pura". La CDU gestisce il circuito secondario e la dissipazione del calore sulle cold plates, mentre le rear-doors catturano il calore residuo in uscita dai server.

- **Vantaggio:** il calore non entra mai in sala. Il rack è termicamente neutro;
- **Ideale per:** sale senza corridoi compartimentati o con soffitti bassi dove la gestione dei flussi d'aria è difficile.

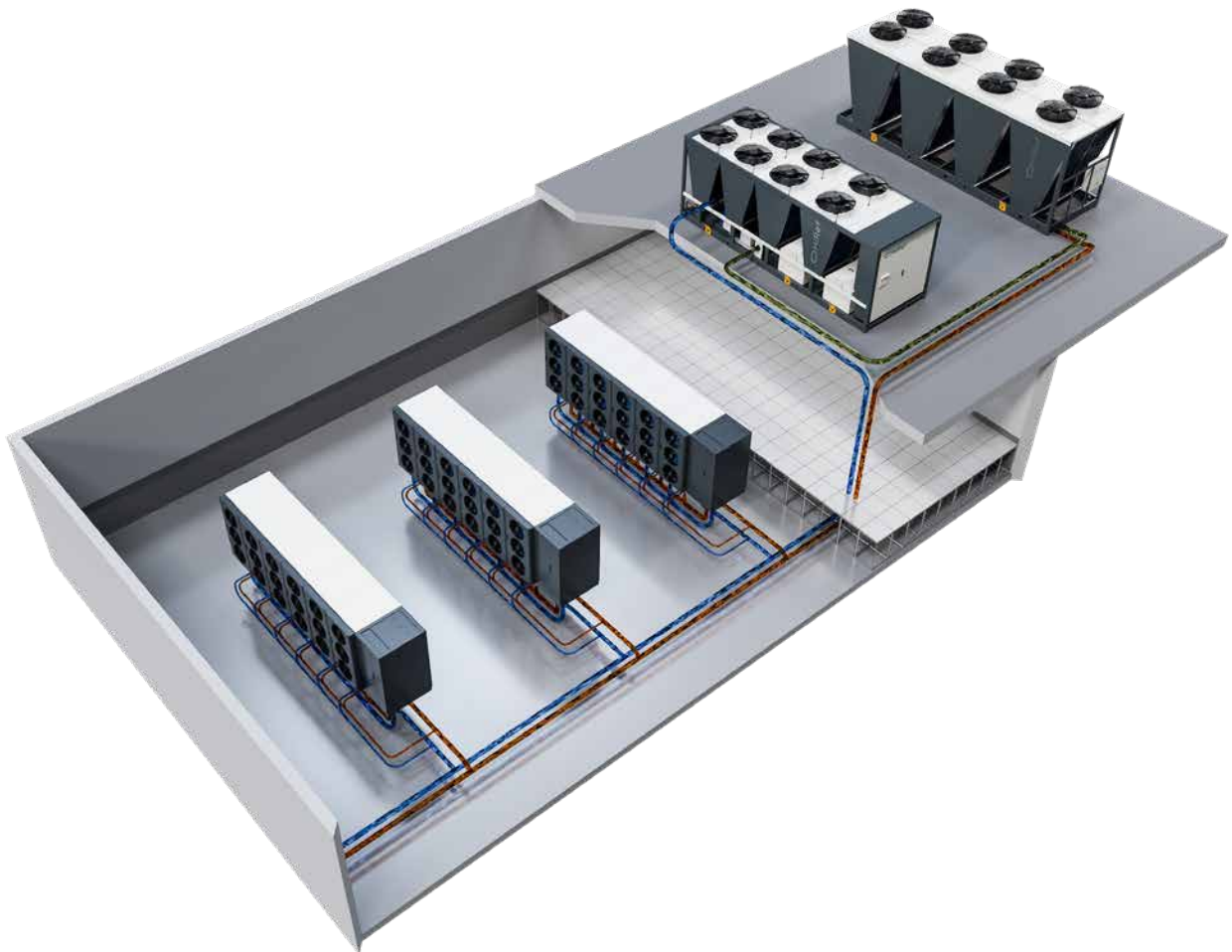
La rear-door rappresenta una tecnologia versatile, che può essere adottata anche in stand-alone per sale da 30-40 kW/rack.

PLUS:

- **Retrofit:** non richiede modifiche ai nodi o installazione di tubi sui processori;
- **Room Neutral:** rende il data center indipendente dal sistema di condizionamento dell'aria ambiente (CRAC), poiché il rack non emette aria calda nella stanza.

MINUS:

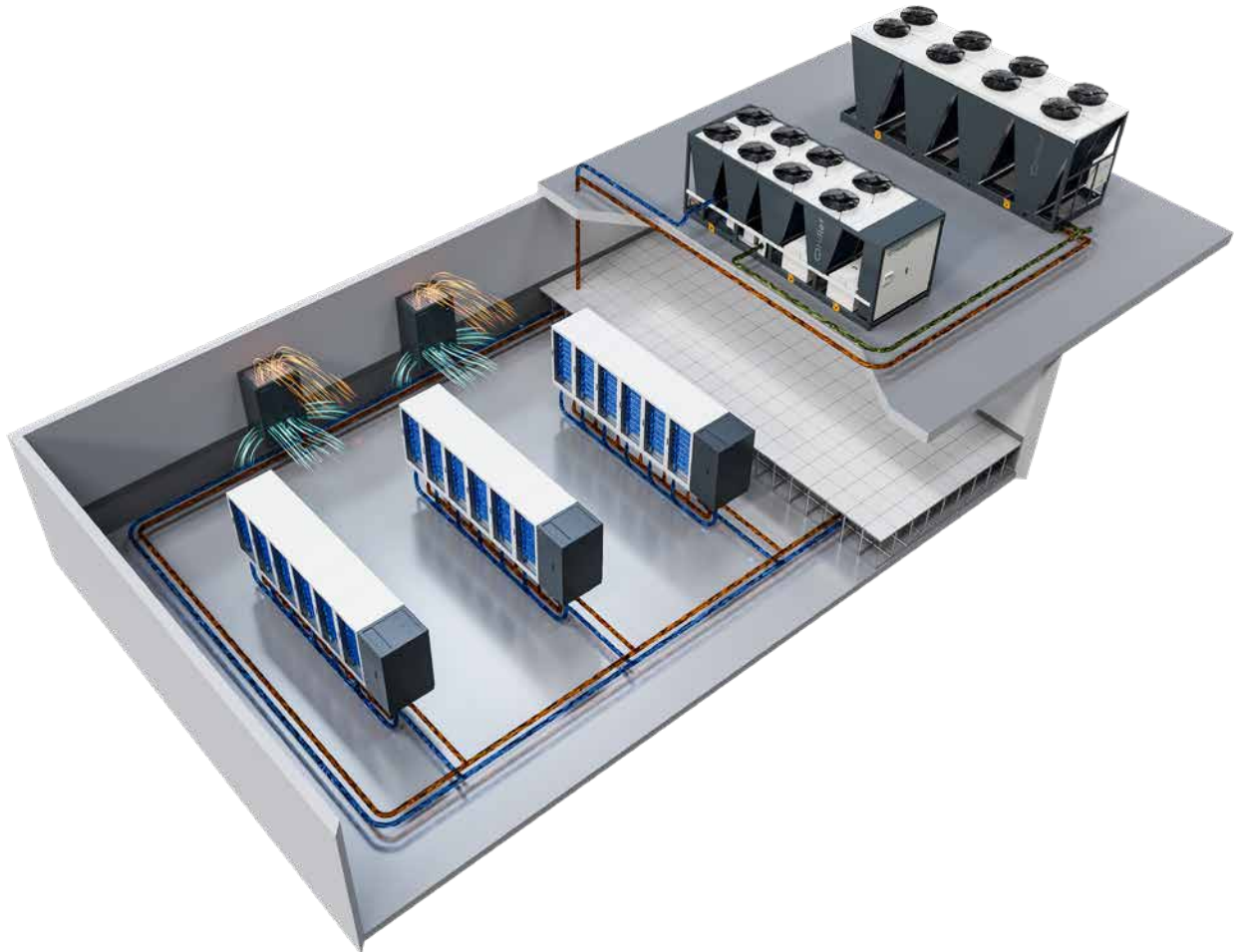
- **Dipendenza dalle ventole:** i server devono comunque mantenere ventole interne potenti per spingere l'aria attraverso la porta, mantenendo alti consumi e rumore;
- **Limite fisico dello scambio ad aria:** sopra i 40kW il raffreddamento ad aria, da solo, non è più una strada percorribile e deve essere integrato con il liquid cooling.



5.1.2 CDU + Unità Perimetrali (CRAC/CRAH)

In questo scenario, la CDU gestisce il circuito secondario e il raffreddamento delle cold plates, mentre le unità perimetrali (CRAH) gestiscono il carico residuo e il controllo dell'umidità ambientale.

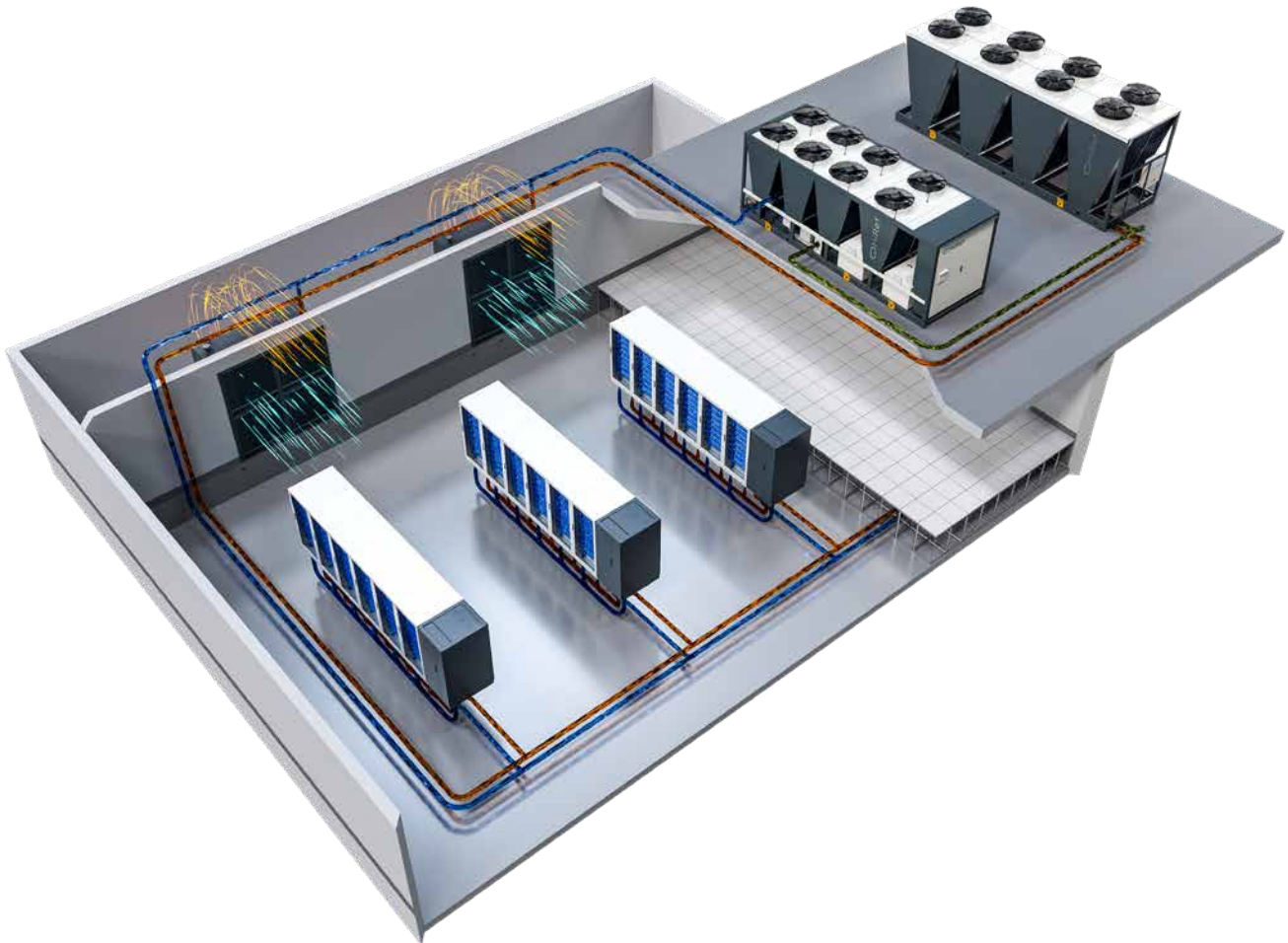
- **Vantaggio:** permette di riutilizzare l'infrastruttura esistente in caso di retrofitting;
- **Ideale per:** data center esistenti che aggiungono cluster AI in zone dedicate della white room.



5.1.3 CDU + Fanwall

In questo scenario, la CDU gestisce il circuito secondario e il raffreddamento delle cold plates, mentre la quota parte del carico dissipata in aria è gestita dai fanwall.

- **Vantaggio:** alta efficienza energetica, ingombro ridotto nel white space;
- **Ideale per:** grandi data center hyperscale DTC progettati ex-novo.



5.2 L'ecosistema completo del liquid cooling

L'ecosistema completo del liquid cooling può essere visto come una piramide di scambi e flussi di calore su 3 livelli:

1. **Livello Server:** la cold plate catturano il calore generato dal chip e lo trasferiscono al PG25;
2. **Livello CDU:** lo scambiatore a piastre all'interno della CDU trasferisce il calore dal circuito secondario (PG25) al circuito primario (tipicamente acqua / acqua glicolata);
3. **Livello esterno:** il chiller e/o il dry cooler dissipano il calore nell'ambiente esterno.

La corretta integrazione tra CDU, macchine ad aria e sistemi di dissipazione esterna ridefinisce il profilo energetico del data center, permettendo di abbattere il pPUE di raffreddamento sotto l'1.1. Il vantaggio competitivo di questa architettura risiede nell'analisi stagionale: operando con temperature del circuito primario elevate, è possibile sfruttare il free-cooling per la grande maggioranza dei giorni dell'anno in moltissime zone

climatiche, limitando l'intervento dei chiller solo a rari picchi termici estivi.

Questo approccio consente di massimizzare il risparmio energetico durante i periodi freddi e intermedi, trasformando l'efficienza stagionale in un driver fondamentale per la riduzione dei costi operativi (OpEx) e il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità ambientale.

5.3 La distribuzione del liquido in sala

Mentre nei data center raffreddati ad aria la distribuzione avviene tramite la pressurizzazione del sottopavimento, nel liquid cooling la distribuzione è costituita da una rete fisica di tubazioni che deve essere progettata per garantire continuità operativa e bilanciamento del sistema, oltre che minimizzare il rischio di perdite. Gli elementi chiave del circuito di distribuzione sono i seguenti:

- **Manifold di distribuzione:** collettori che ripartiscono il liquido del circuito secondario tra i vari server di uno stesso rack. Realizzati in Acciaio Inox AISI 304/316L con saldature

orbitali/TIG per eliminare bave interne che potrebbero staccarsi e ostruire le cold plate;

- **Innesti Rapidi (Quick Disconnects - QD):** i connettori che fungono da collegamento tra i vari componenti critici del circuito. Rappresentano il componente più sollecitato durante la vita del data center. È fondamentale l'uso di connettori "Non-Drip" (antigoccia) con tecnologia a faccia piana per evitare che possano cadere gocce di liquido sui server.

6 COOLANT DISTRIBUTION UNIT



La Coolant Distribution Unit (CDU) rappresenta la chiave di volta per la scalabilità dei data center moderni. La sfida ingegneristica attuale consiste nel massimizzare la densità di scambio termico riducendo al minimo il footprint.

Le unità di ultima generazione sono in grado di gestire carichi termici massivi, raggiungendo potenze fino a 1400 kW in un footprint di soli 900 mm x 1200 mm. Tale densità di potenza è resa possibile da un'ingegnerizzazione avanzata che garantisce un approccio termico di 4K, permettendo di operare in regime di full free-cooling per la maggior parte dell'anno operativo, ottimizzando drasticamente il PUE globale.

La CDU funge da barriera di separazione e sistema di gestione tra i due mondi idraulici che compongono il data center:

1. **Primary Loop (Facility Water System - FWS):** Il circuito lato edificio, collegato a sistemi di dissipazione esterni, che tipicamente lavora con ΔT 10°C;
2. **Secondary Loop (Technology Cooling System - TCS):** il circuito lato IT, dove circola il fluido più "nobile", il PG25. Qui, la CDU garantisce stabilità di pressione, purezza del fluido e controllo accurato della temperatura per prevenire la condensa.

6.1 Componenti della CDU



SCAMBIATORI DI CALORE

Il trasferimento del calore tra i fluidi primario e secondario avviene attraverso scambiatori a piastre saldobrasate in acciaio inossidabile AISI 316L, caratterizzati da elevato coefficiente di scambio e ottima resistenza alla corrosione. Gli scambiatori sono dimensionati per avere un approccio nominale di 4K.

GRUPPO DI POMPAGGIO

La movimentazione del fluido del circuito secondario è affidata a pompe centrifughe ad alta efficienza in configurazione ridondata N+1. Le pompe sono gestite tramite inverter, e sono quindi in grado di modulare la portata in base al carico termico istantaneo dei rack.

FILTRI

I micro-canali delle cold plates hanno dimensioni dell'ordine dei 200 micron: è indispensabile quindi prevedere una opportuna filtrazione al fine di evitare ogni possibile sporcamento o ostruzione degli stessi. La CDU integra pertanto un sistema di filtri duplex ridondanti N+1:

- Le cartucce filtranti sono selezionabili fino a 25 micron, garantendo la cattura anche delle particelle più piccole che potrebbero causare erosione o ostruzione nei server;
- La configurazione duplex permette di isolare e sostituire la cartuccia "a caldo", senza quindi dover interrompere la continuità operativa del circuito secondario e assicurando l'uptime anche durante le fasi di manutenzione ordinaria.

VALVOLA PICV

All'interno della CDU, la valvola di regolazione indipendente dalla pressione (Pressure Independent Control Valve, PICV) svolge il duplice ruolo di regolatore di portata e stabilizzatore di pressione, agendo come il "regolatore di precisione" del loop primario:

- **Indipendenza dalla pressione:** a differenza delle valvole di regolazione tradizionali, la PICV mantiene una portata costante verso lo scambiatore di calore, indipendentemente dalle fluttuazioni di pressione nella rete idrica del data center;
- **Ottimizzazione del deltaT:** regolando dinamicamente il flusso d'acqua in base al carico termico reale dei server, la PICV assicura che l'acqua in uscita dal primario sia alla massima temperatura possibile. Questo è essenziale per l'efficienza dei sistemi di "District Heating" o dei chiller in modalità free-cooling.

CONNESSIONI CONFIGURABILI

Per adattarsi sia a nuovi edifici (Greenfield) sia a riqualificazioni di sale esistenti (Retrofitting), la CDU è progettata con uscite configurabili sia in alto che in basso. Questa predisposizione permette di accogliere le tubazioni provenienti dal soffitto o dal pavimento flottante senza necessità di modifiche strutturali alla macchina o l'aggiunta di giunti o raccordi in fase di montaggio.

ATTACCO DI CARICA

Al fine di facilitare il riempimento del loop secondario con il PG25, la CDU presenta nel circuito secondario un attacco di carica predisposto per l'attacco alla pompa di riempimento. In alcuni casi, la pompa può essere direttamente integrata all'interno del frame della CDU.

6.2 Logiche di regolazione

La complessità del liquid cooling risiede nella dinamicità estrema dei carichi. Rispetto ai carichi di lavoro enterprise tradizionali, che presentano variazioni prevedibili e graduali, l'ecosistema AI introduce una volatilità termica senza precedenti.

DINAMICA DEI CARICHI DURANTE IL TRAINING

Durante le fasi di Training di un Large Language Model (LLM), i server non operano a un regime costante. Il carico termico segue l'andamento dei "batch" di calcolo:

- **Picchi istantanei:** quando il cluster avvia l'elaborazione di un set di dati, il consumo energetico di un rack può passare da 10 kW (idle/waiting) a 80-100 kW in pochi secondi;
- **Oscillazioni cicliche:** durante il training, si osservano cicli continui di "Compute" (carico al 100%) seguiti da brevissime pause di "Sync/Communication" (calo del carico), creando un profilo termico a "dente di sega".

A differenza dei sistemi ad aria, dove la massa d'aria nella sala funge da parziale "volano termico", nel liquid cooling il calore viene trasferito in maniera istantanea al fluido. Senza una CDU capace di modulare la portata, queste oscillazioni causerebbero stress termici sui die dei processori, accorciandone la vita utile o innescando fenomeni di thermal throttling che vanno a rallentare l'intero processo di training.

CONTROLLO PID E MODULAZIONE DELLA PORTATA

Per gestire questa variabilità, il cuore della regolazione è basato su algoritmi PID che agiscono sugli inverter delle pompe (VFD).

- **Gestione della pressione differenziale:** la CDU monitora costantemente la differenza di pressione tra mandata e ritorno del circuito secondario, con l'obiettivo di mantenere un deltaP costante ai rack, permettendo al sistema di rispondere istantaneamente all'apertura o chiusura delle valvole locali sui nodi server durante i picchi di calcolo;
- **Modulazione termica:** regolando la velocità delle pompe e la valvola PICV sul circuito primario, la CDU stabilizza la temperatura di mandata al valore target, compensando le rapide fluttuazioni del ritorno provocate dai cicli di training dell'IA.

CONTROLLO E GESTIONE DEL DEW POINT

Uno dei rischi più grandi in una sala data center ibrida è la formazione di condensa: la CDU integra pertanto sensori di umidità e temperatura ambiente, andando a calcolare in tempo reale il punto di rugiada della sala e assicurando che la temperatura del fluido di mandata sia sempre superiore di almeno 3-5°C rispetto al dew point.

6.3 Compliance server NVIDIA

Per un progettista, la compliance con gli standard dei vendor di chip è il requisito per garantire l'affidabilità dell'investimento IT. Le architetture NVIDIA Blackwell (GB200) impongono parametri rigorosi per le CDU:

- **Filtrazione:** NVIDIA richiede una filtrazione rigorosa per proteggere i micro-canali delle GPU. La predisposizione delle nostre macchine con filtri a cartuccia da 25 micron eccede gli standard, prevenendo l'erosione dei componenti interni;
- **Stabilità della portata:** La CDU deve gestire variazioni repentine senza oscillazioni di pressione superiori al 5%, una specifica critica per i sistemi HGX/GB200;
- **Protocolli di comunicazione:** supporto nativo per Modbus TCP/IP, BACnet o SNMP, permettendo una telemetria completa integrata nel sistema di gestione del cluster;
- **Ridondanza:** sistema di pompaggio ridondato N+1 e controllori ridondati per rispondere ai requisiti di High Availability.

7 EFFICIENZA, SOSTENIBILITÀ E RECUPERO DEL CALORE

7.1 Oltre il PUE: la definizione dell'ERF

Il Power Usage Effectiveness (PUE) è stato per anni l'unico riferimento per l'efficienza dei data center. Tuttavia, con l'avvento dei data center raffreddati a liquido, ci si trova davanti ad una situazione caratterizzata da un duplice trend: il PUE tende sempre più a valori prossimi all'unità, mentre sia le temperature che le potenze in gioco nei data center tendono a crescere, rendendo tanto semplice quanto necessario il recupero del calore generato.

A questo punto, il PUE da solo non è più sufficiente a descrivere il "reale" impatto di un data center, ma va affiancato da un KPI in grado di quantificarne il valore "circolare", ossia quanta parte del calore prodotto viene recuperato e riutilizzato: si arriva così alla definizione dell'Energy Reusage Factor (ERF).

ERF = Energia Riutilizzata / Energia Totale del data center

Mentre il PUE si limita a misurare quanta energia viene "sprecata", l'ERF misura quanta energia viene reimpressa nel sistema: il cambio di paradigma è netto, passando dal modello "heat-as-a-waste" a "heat-as-a-source".

Pertanto, maggiore è la quota parte di energia recuperata e riutilizzata, minore sarà il valore dell'ERF.

7.2 Strategie di recupero del calore

Nel raffreddamento a liquido, recuperare il calore generato dal carico IT è più semplice rispetto che in quello ad aria. Infatti, la temperatura di ritorno del fluido secondario raggiunge valori prossimi o addirittura superiori a 40°C, rendendo possibile sia il riutilizzo diretto, che l'immissione in una pompa di calore ad altissima temperatura.

DISTRICT HEATING

Il circuito primario della CDU viene collegato ad una pompa di calore ad altissima temperatura, che va ad alimentare la rete di teleriscaldamento.

Un cluster AI da 10 MW può riscaldare circa 2000-3000 abitazioni moderne: in molti paesi europei, questo permette al data center di ottenere incentivi governativi o di ridurre drasticamente le tasse sulle emissioni di CO₂.

PROCESSI INDUSTRIALI / AGRICOLTURA 4.0

Oltre al teleriscaldamento, il calore a media temperatura costante 24/7 si presta ad una moltitudine di altre applicazioni:

- **Serre idroponiche:** mantenimento della temperatura ideale per colture intensive, riducendo i costi di riscaldamento;
- **Impianti di essiccazione o preriscaldamento in processi industriali** che richiedono acqua calda per fasi di lavaggio o preparazione chimica;
- **Riscaldamento delle piscine.**

EFFICIENTAMENTO DELL'INFRASTRUTTURA LOCALE

In assenza di reti esterne, il calore può essere utilizzato per:

- Migliorare l'efficienza del data center stesso;
- Riscaldare gli uffici amministrativi / magazzini;
- Preriscaldare l'acqua sanitaria (DHW) per edifici adiacenti.

7.3 Quadro normativo

L'adozione del raffreddamento a liquido e l'implementazione di strategie per la massimizzazione dell'ERF (**Energy Reuse Factor**) sono oggi pilastri fondamentali per la compliance alle nuove direttive internazionali e per l'accesso ai mercati dei capitali.

LA DIRETTIVA EUROPEA EED

La revisione della direttiva EED 2023/1791 (Energy Efficiency Directive) ha introdotto obblighi di rendicontazione e trasparenza senza precedenti per il settore:

- **Obbligo di recupero calore:** il Regolamento Delegato (UE) 2024/1364 impone ai data center con una potenza nominale superiore a 1 MW di condurre analisi costi-benefici per l'utilizzo del calore di scarto attraverso reti di teleriscaldamento o altre applicazioni industriali, con un minimo ERF pari a 0.20;
- **Database Europeo:** dal 2024, i gestori di data center sopra i 500 kW devono obbligatoriamente pubblicare annualmente i propri KPI, inclusi PUE, WUE e ERF, all'interno della piattaforma europea per il monitoraggio dell'efficienza dei data center;
- **Tassonomia Verde UE:** il raffreddamento a liquido rappresenta una delle "Enabling Technologies" che facilitano il rispetto delle soglie di emissione previste per classificare un investimento come "Sostenibile" secondo i criteri tecnici della Tassonomia UE (Regolamento 2020/852).

DECARBONIZZAZIONE DEGLI SCOPE 2 E 3

L'integrazione di sistemi Direct-to-Chip impatta direttamente sulla strategia di decarbonizzazione aziendale definita dal **GHG Protocol (Green House Gas Protocol)**:

- **Riduzione Scope 2 (Emissioni Indirette da Energia):** L'efficienza intrinseca del liquido riduce drasticamente l'energia necessaria per il raffreddamento (PUE sotto 1.1), abbattendo le emissioni legate all'acquisto di energia elettrica;
- **Riduzione Scope 3 (Catena del Valore e Circolarità):** In un'ottica di Circular Economy, l'integrazione di sistemi di recupero del calore permette al data center di evolvere da utente energivoro a fornitore attivo di energia termica per la comunità, generando le cosiddette "Avoided Emissions" (emissioni evitate). Sebbene secondo il GHG Protocol queste non sottraggano matematicamente tonnellate di CO₂ dallo Scope 3 dell'azienda, la loro rendicontazione all'interno della CSRD (Corporate Sustainability Reporting

Directive) attesta un modello di business rigenerativo e di simbiosi industriale.

Tale approccio circolare riduce i rischi di transizione normativa, migliora sensibilmente il rating ESG e facilita l'accesso a strumenti di finanza agevolata, come i Green Bonds, rendendo l'infrastruttura un asset prioritario per gli investitori istituzionali orientati alla sostenibilità a lungo termine.

8 SFIDE OPERATIVE, MANUTENZIONE E SICUREZZA

8.1 Gestione chimica e monitoraggio del PG25

La stabilità chimica del PG25 è essenziale per prevenire la corrosione galvanica e il "biofouling": è pertanto necessario un campionamento, almeno semestrale, del fluido del circuito secondario, al fine di monitorare:

- **Livello di glicole:** per garantire che la protezione antigelo e le proprietà termiche rimangano costanti;
- **Riserva di alcalinità (pH):** un abbassamento del pH indica un'ossidazione del glicole, che può diventare acido e attaccare i metalli. Il valore ideale del pH deve oscillare tra 8.0 e 9.5;
- **Concentrazione di inibitori:** i passivanti per rame e acciaio devono essere attivi.

È importante gestire correttamente il refill del circuito secondario: ogni reintegro di fluido deve essere effettuato con miscela pre-diluita di grado industriale, mentre l'aggiunta di acqua di rete non trattata comprometterebbe la conduttività elettrica e la purezza del loop.

8.2 Manutenzione ordinaria della CDU

La presenza di micro-canali nelle cold plates (con gap inferiori a 200 micron) rende la filtrazione l'operazione di manutenzione più critica.

- **Filtri a cestello duplex nella CDU:** la manutenzione dei filtri da 25 micron avviene tramite il monitoraggio della pressione differenziale. Un aumento del deltaP indica l'intasamento della cartuccia. Grazie alla configurazione duplex, è possibile effettuare la manutenzione a caldo del sistema, andando ad isolare filtri uno alla volta tramite le valvole di sezionamento, senza soluzione di continuità nel funzionamento della macchina;
- **Degasaggio:** l'aria intrappolata nel circuito può causare erosione localizzata: è fondamentale pertanto controllare regolarmente il corretto funzionamento delle valvole di sfogo automatico.

8.3 Manutenzione dei server

La manutenzione di un sistema Direct-to-Chip (DTC) moderno è progettata per essere facile e rapida, nonché in grado di mantenere la continuità operativa.

OPERAZIONI HOT-SWAP

Il cuore della manutenibilità risiede negli innesti rapidi UQD (Universal Quick Disconnects). Questi connettori sono progettati ad hoc in maniera da essere intrinsecamente "non-drip",

minimizzando il rischio di gocciolamento del PG25 sui server o più in generale nel white space e impedendo allo stesso tempo l'intrappolamento di bolle d'aria nel circuito. Inoltre, grazie alla modularità dei rack e ai collettori dotati di valvole di intercettazione per ogni slot, è possibile andare ad intervenire in maniera mirata isolando solamente il server interessato dalla manutenzione, senza andare ad influenzare portata e pressione negli altri nodi.

PREVENZIONE DELLE PERDITE

La manutenzione preventiva include l'ispezione dei percorsi idraulici interni allo chassis e delle guarnizioni, al fine di prevenire ogni possibile perdita di fluido:

- **Leak detection:** i rack raffreddati a liquido integrano sensori a filo o puntiformi posizionati sul fondo dello chassis, in grado di inviare un segnale di allarme e spegnere il server in caso di valori anomali di umidità;
- **Curvatura dei tubi:** durante la manutenzione, è indispensabile verificare che i tubi flessibili interni (FEP/EPDM) non abbiano subito torsioni o strozzature che potrebbero aumentare la resistenza idraulica locale;
- **Guarnizioni (o-ring) degli innesti rapidi:** gli O-ring devono essere ispezionati periodicamente. L'uso di guarnizioni di alta qualità riduce la necessità di manutenzione, ma cicli frequenti di inserimento/disinserimento possono richiedere una leggera lubrificazione con prodotti compatibili con il PG25 per evitare lacerazioni della gomma che porterebbero a micro-perdite.

9 FRONTIERE FUTURE – DATA CENTER A 800V

9.1 Lo stato attuale: distribuzione a 400V AC

Ad oggi, nei data center la distribuzione avviene a 400V AC in sala e a 48V DC a livello del rack. Tuttavia, l'avvento dei cluster AI con densità superiori 150 kW/rack rende l'architettura odierna basata su busbar (barre di potenza in rame) a 48V molto stressata dal punto di vista elettromeccanico.

Considerando un rack da 100kW, le busbar a 48V richiedono un'intensità di corrente superiore a 2000A. Per gestire simili valori di intensità di corrente, è necessario utilizzare multiple busbar parallele oppure un'unica busbar con sezione maggiorata: questo comporta, in entrambi i casi, costi elevati, dimensioni considerevoli e una maggiore complessità di cablaggio.

Inoltre, è necessario considerare che le perdite per effetto Joule lungo le linee di distribuzione interne al rack, che generano un carico termico "parassita" addizionale, crescono in maniera quadratica all'aumentare della corrente: alzare la tensione permette pertanto di minimizzarle.

9.2 La distribuzione a 800V DC

Mutuata dall'ingegneria dei veicoli elettrici (EV) ad alte prestazioni, la distribuzione a 800V in corrente continua sta emergendo come la soluzione definitiva per i data center di nuova generazione. I vantaggi sono plurimi:

- **Riduzione delle sezioni per le busbar:** con una tensione di 800V anziché 48V, la corrente necessaria per alimentare un rack da 100 kW crolla a circa 120A. Questo permette l'utilizzo di conduttori leggeri e flessibili, ottimizzando lo spazio interno allo chassis e facilitando le operazioni di manutenzione;
- **Efficienza di trasporto:** dal momento che le perdite di linea decrescono con il quadrato della tensione, il passaggio dai 400V ai 800V aumenta l'efficienza della distribuzione elettrica oltre il 99%, riducendo drasticamente il calore generato dai cavi;
- **Semplificazione della catena di conversione:** l'architettura HVDC (High Voltage Direct Current) elimina stadi intermedi di raddrizzamento e trasformazione AC/DC. Meno stadi di conversione significano meno componenti soggetti a guasto e una minore quantità di calore totale da smaltire.

9.3 PSU liquid-cooled

La densità di potenza estrema dei nuovi alimentatori (Power Supply Units - PSU) a 800V rende obsoleta la ventilazione forzata. Pertanto, le PSU di nuova generazione integrano cold plates per il raffreddamento, collegate direttamente al circuito secondario gestito dalla CDU: il liquid cooling non è più una prerogativa solo di CPU e GPU, ma si estende a quasi tutti i componenti del rack. Questo cambiamento porta la percentuale del carico

asportata dal liquido a valori di circa 95-98%, diminuendo così drasticamente la necessità di raffreddamento ad aria.

9.4 Sfide degli 800V: sicurezza e gestione ambientale

L'operatività a 800V DC introduce requisiti di sicurezza rigorosi:

- **Prevenzione dell'arco elettrico:** a tensioni del genere, i guasti possono innescare archi elettrici persistenti. È fondamentale l'impiego di connettori con interblocchi di sicurezza e sistemi di protezione ultra-rapidi capaci di isolare il guasto in millisecondi;
- **Prevenzione della condensa:** la vicinanza tra conduttori a 800V e circuiti a liquido richiede un controllo impeccabile del punto di rugiada. La CDU agisce come garante della sicurezza: modulando la temperatura di mandata per evitare la condensa, previene il rischio di cortocircuiti catastrofici in ambiente HVDC.

10 CONCLUSIONI

Nel 2026, possiamo affermare con certezza che il raffreddamento a liquido è definitivamente uscito dalla nicchia dell'HPC per diventare l'unico paradigma tecnico e infrastrutturale capace di sostenere la rivoluzione dell'AI.

Con processori che hanno da tempo superato la soglia "critica" dei 1000W, l'aria non rappresenta più una via percorribile per il raffreddamento dei data center: la transizione verso il liquid cooling non è più una semplice opzione, ma un imperativo.

Questa rivoluzione segna anche l'ingresso della sostenibilità tra i KPIs del data center: il recupero del calore diventa sia obbligo normativo che leva finanziaria, cambiando il paradigma da heat-as-waste a heat-as-source.

In questo modo, il data center passa dall'essere un "bunker isolato" a diventare un vero e proprio "ecosistema energetico urbano", silenzioso e integrato, capace di riscaldare intere comunità.

11 APPENDICE A

11.1 Gestione chimica del fluido e compatibilità dei materiali

SPECIFICHE DELL'ACQUA DI RIEMPIMENTO

Prima della miscelazione con il glicole propilenico, l'acqua utilizzata deve soddisfare requisiti di purezza estremamente elevati. L'uso di acqua di rete, anche se addolcita, è tassativamente vietato a causa della presenza di cloruri e solfati.

Proprietà tipiche dei fluidi termovettori PG 25 e PG 55:

Caratteristica	Prestazione
Aspetto	Limpido e privo di particolato
pH del fluido	8,0 - 10,5 Il pH del fluido dipende dalla formulazione degli inibitori di corrosione e può essere più basso quando si utilizza tecnologia con acidi organici (OAT)
Alcalinità residua non corretta	>4 mL, riferito al fluido diluito Misura della capacità tampone del fluido
Rame	<2 ppm
Ferro	<2 ppm
Durezza totale	<20 ppm Valori elevati di durezza indicano l'utilizzo di acqua di scarsa qualità
Cloruri	<5 ppm Valori elevati di cloruri indicano l'utilizzo di acqua di scarsa qualità
Solfati	<10 ppm Valori elevati di solfati indicano l'utilizzo di acqua di scarsa qualità

CARATTERISTICHE DEL PG25

Il fluido operativo deve essere una miscela di glicole propilenico di grado industriale con un pacchetto di inibitori di corrosione multi-metallo pre-formulato.

Funzioni degli Inibitori:

- 1. Passivanti del Rame (Azoli):** Creano un film monomolecolare sulle superfici in rame delle cold plate per prevenire l'ossidazione e la dissoluzione ionica;
- 2. Tamponi di pH (Buffer):** Mantengono il fluido in ambiente alcalino (pH tra 8.5 e 10.5) per neutralizzare i prodotti acidi derivanti dalla naturale degradazione del glicole nel tempo;
- 3. Inibitori per Acciaio/Inox:** Proteggono i collettori e i componenti della CDU dalla corrosione per vaiolatura (pitting).

Rischi della Degradazione (Glicolisi)

Se esposto a temperature elevate e ossigeno, il glicole propilenico può degradarsi in acidi organici (acido glicolico, acido formico). Questo abbassa il pH e trasforma il fluido in un agente corrosivo. Il monitoraggio della Riserva di Alcalinità è l'unico modo per prevedere questo fenomeno.

COMPATIBILITÀ DEI MATERIALI

Per garantire una vita utile di 20 anni, il loop secondario deve rispettare stringenti requisiti relativi alla compatibilità galvanica: l'interazione tra metalli con potenziali elettrochimici distanti è la causa principale di guasti nei sistemi liquid-to-chip.

Materiali Approvati:

- **Metalli e leghe metalliche:** Rame, Ottone con <15% di zinco, Acciaio Inox, Nichel, leghe ad alto contenuto di Nichel, Cromo, Titanio, B-Ni-6, BCuP-2, BCuP-3, BCuP-4, BCuP-5, TF-H60F;
- **Elastomeri, plastiche e altri materiali:** EPDM, Viton A, Viton GF, Viton ETP, FEP, PTFE, PP, HDPE, PEEK, Loctite 567.

Materiali Vietati:

- **Alluminio (anche anodizzato):** estremamente sensibile alla corrosione galvanica in presenza di rame;
- **Acciaio Zincato (Galvanizzato):** lo zinco reagisce con i pacchetti di inibitori del glicole, creando morchie e depositi solidi;
- **Saldature a Stagno/Piombo:** possono essere attaccate chimicamente dagli inibitori del glicole;
- **EPDM contenente Zolfo:** può rilasciare composti che attaccano il rame.

12 APPENDICE B

12.1 Protocollo operativo di commissioning e collaudo

Il presente protocollo definisce le procedure standard per il Testing and Commissioning (T&C) delle Coolant Distribution Units e dell'infrastruttura idraulica associata. Gli obiettivi sono la validazione dell'integrità meccanica e della risposta dinamica dei sistemi di controllo prima dell'integrazione del carico IT, oltre che la pulizia generale del circuito.

FASE 1: TEST PNEUMATICO DEL CIRCUITO

Prima di riempire il circuito secondario con il PG25, il sistema deve essere testato sotto pressione per evidenziare eventuali perdite.

- **Procedura:** isolare la CDU dai rack tramite le valvole di intercettazione; - Pressurizzare il circuito secondario con Azoto anidro a una pressione pari a 1.5 volte la pressione operativa di progetto (tipicamente 6-8 bar);
- **Durata: 24 ore;**
- **Criterio di Accettazione:** caduta di pressione <1% dopo compensazione della temperatura ambiente.

Nota: l'uso dell'azoto è tassativo rispetto all'aria compressa per evitare l'introduzione di umidità e contaminanti oleosi nel loop.

FASE 2: FLUSHING E PASSIVAZIONE

Il lavaggio (flushing) del circuito è un'operazione critica: se non correttamente espulsi dal circuito, residui di saldatura, scaglie metalliche e oli di lavorazione possono distruggere le cold plates in brevissimo tempo.

Protocollo di flushing a circuito chiuso:

1. **Bypass dei server:** assicurarsi che tutti i rack/server siano esclusi dal circuito. Il fluido di lavaggio non deve mai attraversare le cold plates durante questa fase;
2. **Soluzione detergente:** utilizzare acqua demineralizzata additivata con un detergente disperdente specifico per circuiti multimetallo;
3. **Velocità di flushing:** le pompe della CDU devono operare alla massima frequenza per garantire una velocità del fluido di almeno 1.5 m/s, necessaria per trascinare i detriti pesanti verso i filtri della CDU;
4. **Ispezione filtri:** monitorare il deltaP sui filtri a cestello. Pulire le cartucce ogni 2 ore circa finché non si riscontra più accumulo di detriti;
5. **Passivazione:** dopo il lavaggio, è necessario applicare un agente passivante che crei un film protettivo sulle superfici interne in rame e acciaio inox, prevenendo l'ossidazione immediata prima del riempimento finale con PG25.

FASE 3: RIEMPIMENTO DEFINITIVO E DE-AERAZIONE

Il riempimento con il fluido operativo (PG25) deve avvenire evitando la cavitazione delle pompe.

- **Procedura di riempimento:** utilizzare l'unità di pompaggio ausiliaria (make-up pump) per caricare il sistema dal punto più basso. La CDU deve essere dotata di un attacco di carica per la make-up pump, prevedere direttamente la pompa al suo interno.
- **Ciclo di degasaggio:** attivare le pompe della CDU a velocità variabile (cicli 20%-80%-20%) per favorire il distacco delle bolle d'aria dalle pareti delle tubazioni.
- **Monitoraggio degli sfiati:** verificare manualmente ogni valvola di sfiato nei punti alti del manifold di rack. Un sistema correttamente de-aerato deve risultare acusticamente "silenzioso".

FASE 4: VALIDAZIONE DELLE LOGICHE DI CONTROLLO

Test del ciclo PID

- **Procedura:** simulare la variazione di carico IT aprendo e chiudendo le valvole di intercettazione di diversi rack.
- **Verifica:** la CDU deve modulare la velocità delle pompe per mantenere il deltaP al set-point programmato con un errore massimo del 5%.

Test dew point control

- **Procedura:** Utilizzare un generatore di vapore portatile in prossimità dei sensori igrometrici della CDU per innalzare artificialmente l'umidità rilevata.
- **Risposta attesa:** La CDU deve forzare l'apertura della valvola di miscelazione sul primario per innalzare la temperatura di mandata sopra il dew point calcolato, attivando simultaneamente l'allarme visivo/remoto.

Failover delle pompe

- **Procedura:** Simulare un guasto elettrico sulla Pompa 1 (scatto magnetotermico).
- **Verifica:** La Pompa 2 (in standby) deve avviarsi entro 5 secondi, garantendo la continuità della portata senza che la temperatura di mandata superi la soglia di allarme critico.

FASE 5: SITE ACCEPTANCE TEST (SAT) E HANDOVER

L'ultima fase prevede la firma dei documenti di collaudo e la consegna della telemetria.

- **Integrazione BMS:** Verificare che tutti i punti Modbus/BACnet siano leggibili dal sistema di gestione centrale del data center.
- **Verifica delle portate nominali:** misurazione con flussimetro ultrasonico esterno su ogni stacco rack per confermare che la distribuzione idraulica sia bilanciata.
- **Documentazione finale:** consegna del "As-Built" idraulico, dei log di analisi chimica iniziale del fluido e del certificato di taratura dei sensori.



Viale Spagna, 31/33 - 35020 Tribano (PD) - Italia
Tel. +39 049 9588511 - Fax +39 049 9588522
P.Iva e C.F. IT02191431200
info@hiref.it - www.hiref.it

  /HiRef S.p.A.