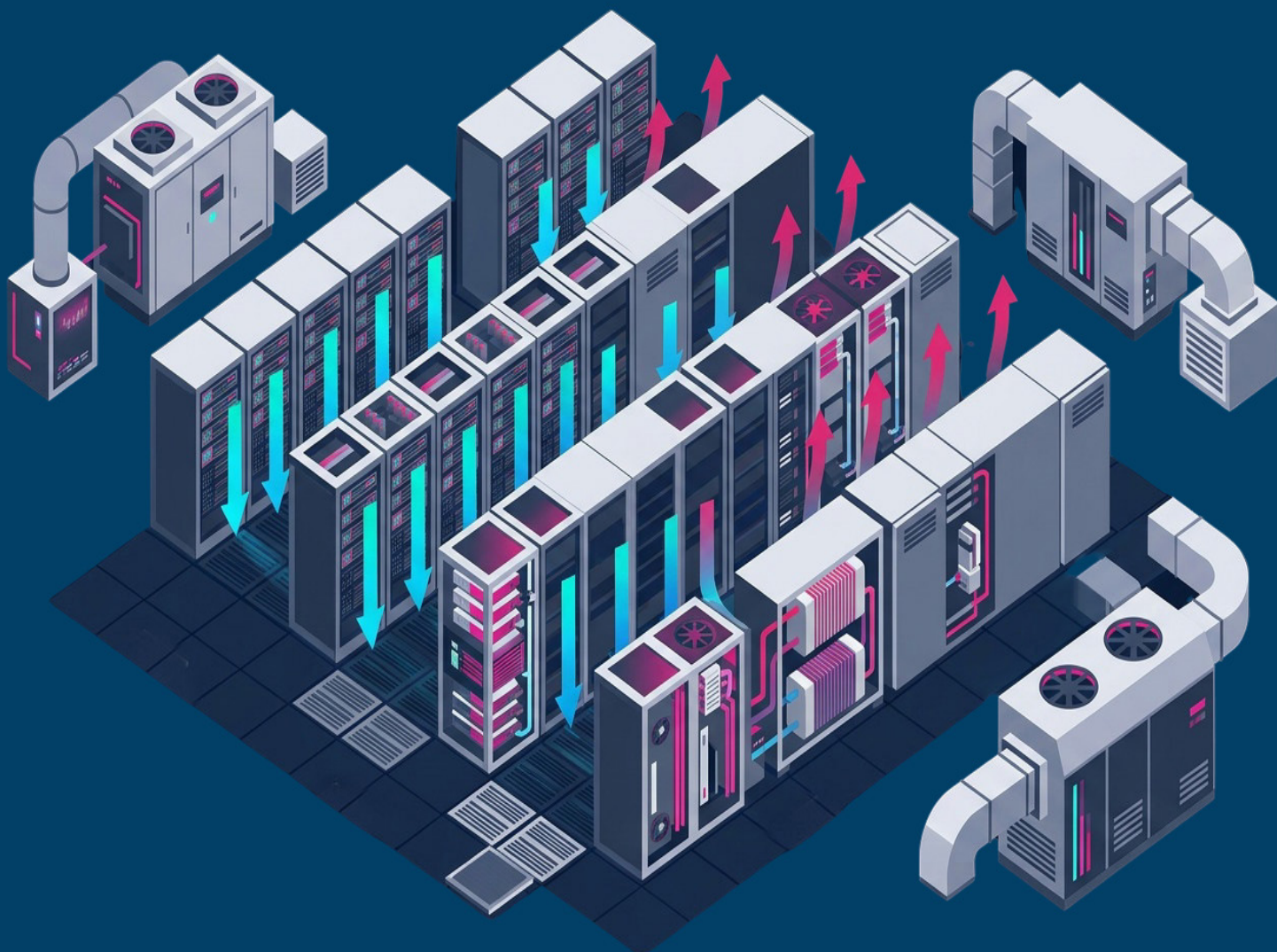


Arrefecer para não falhar

Psicrometria aplicada, tecnologias de arrefecimento e gestão do fluxo de ar: o guia completo do sistema de arrefecimento em data centers



Introdução

O calor é o inimigo silencioso número um do hardware num data center. Ao contrário de uma falha elétrica, que provoca uma paragem imediata, a falha térmica atua de forma progressiva: eleva a temperatura dos componentes, reduz o seu tempo de vida, provoca erros intermitentes e, por fim, para o sistema por proteção térmica ou por dano permanente.

O sistema de arrefecimento representa em muitos data centers entre 30% e 40% do consumo total de energia. É, a par do sistema elétrico, o subsistema com maior impacto na disponibilidade e na eficiência operacional. No entanto, a sua complexidade técnica faz com que seja também um dos sistemas mais frequentemente mal concebidos, mal dimensionados ou mal operados.

Este e-book abrange a disciplina completa do arrefecimento em data centers: desde os fundamentos da psicrometria que definem as condições de operação, até às tecnologias mais avançadas de free cooling e gestão do fluxo de ar. Destina-se a profissionais com base técnica que pretendem compreender o sistema em profundidade, não apenas operar os seus controlos.

O que vai encontrar neste e-book

- Psicrometria aplicada: DB, WB, ponto de orvalho.
- Por que razão o ar condicionado de conforto destrói os servidores.
- Gamas ASHRAE: temperatura e humidade em equipamentos TI.
- As 5 principais tecnologias de arrefecimento.
- Free Cooling: direto e indireto.
- Gestão do fluxo de ar e corredores frios/quentes.
- Contenção de corredores: a prática com maior impacto na eficiência
- Densidade de rack e a sua relação com o sistema de arrefecimento.

Psicrometria aplicada ao data center

A psicrometria é o ramo da física que estuda as propriedades termodinâmicas do ar húmido. No contexto de um data center, três grandezas psicrométricas são fundamentais para compreender e dimensionar corretamente o sistema de arrefecimento: a temperatura de bolbo seco (DB), a temperatura de bolbo húmido (WB) e o ponto de orvalho (DP).

As três temperaturas que definem o ambiente

Grandeza	Símbolo	Definição	Relevância no DC
Temperatura de bolbo seco	DB	Temperatura do ar medida com um termómetro convencional não afetado pela humidade	É a referência principal das gamas operacionais de equipamentos TI. A mais utilizada nas especificações dos fabricantes
Temperatura de bolbo húmido	WB	Temperatura mínima atingível por evaporação de água. Sempre igual ou inferior à DB	Indicador combinado de temperatura e humidade. Utilizada para avaliar sistemas de arrefecimento evaporativo
Ponto de orvalho	DP	Temperatura à qual o vapor de água atinge 100% de HR e começa a condensar	Limite crítico: se a superfície de um componente estiver abaixo do DP, há condensação e risco de curto-circuito

O ponto de orvalho: o limite que não pode ser ultrapassado

O ponto de orvalho é o parâmetro psicométrico mais crítico do ponto de vista operacional. Quando a temperatura de qualquer superfície na sala de servidores desce abaixo do ponto de orvalho, o vapor de água do ar condensa nessa superfície. Se essa superfície for um circuito eletrônico, um módulo de memória ou um conector, o resultado é um curto-circuito imediato ou corrosão acelerada por condensação.

Valor máximo do ponto de orvalho

O ponto de orvalho máximo admissível na sala de servidores é 15 °C, de acordo com as diretrizes ASHRAE TC 9.9. Um ponto de orvalho superior a 15 °C aumenta significativamente o risco de ultrapassar 60% de HR, com o consequente risco de corrosão e condensação no interior dos equipamentos. Este valor deve ser monitorizado em tempo real, não inferido a partir da temperatura e da HR.

Conversões de unidades térmicas essenciais

O sistema de arrefecimento de um data center trabalha com várias unidades de medida que devem ser utilizadas com fluência para interpretar corretamente as especificações dos equipamentos e os balanços térmicos:

Conversão	Resultado	Utilização típica
1 W	3,41 BTU/h	Converter consumo de servidores (W) em calor a dissipar (BTU/h)
1 W	0,000284 RT	Expressar carga térmica em toneladas de refrigeração
1 kW	3.412 BTU/h	Dimensionamento de sistemas CRAC/CRAH
1 RT	12.000 BTU/h	Capacidade de unidades de arrefecimento no mercado americano
1 CFM	Área (ft²) × velocidade do ar (ft/min)	Cálculo do caudal de ar na sala

As gamas ASHRAE — que temperatura deve ter o seu data center

Uma das confusões mais frequentes entre operadores de data centers é qual a temperatura que deve ser mantida na sala de servidores. A resposta não é intuitiva: a temperatura da sala é um indicador incompleto. O que importa é a temperatura de entrada de ar nos equipamentos TI, que é a variável regulada pela ASHRAE.

Gamas de operação térmica para equipamentos Classe A1

Parâmetro	Gama recomendada	Gama permitida	Condição
Temperatura de entrada (DB)	18°C – 27°C	15°C – 32°C	Gama permitida apenas em períodos curtos
Humidade relativa	40% – 60%	8% – 80%	Gama permitida apenas em períodos curtos
Ponto de orvalho máximo	– 9°C a 15°C	–12°C a 17°C	Não ultrapassar 15 °C em operação contínua
Variação máxima de temperatura	5°C/hora	5°C/hora	Para evitar tensão térmica nos componentes
Altitude máxima	950 m	3.000 m acima do nível do mar	Acima desta altitude requer redução de potência

A oportunidade energética da ASHRAE

A revisão das diretrizes ASHRAE alargou a gama recomendada até aos 27 °C na entrada do equipamento. Isto permite elevar a temperatura de fornecimento do sistema de arrefecimento, o que tem um impacto direto na eficiência: cada grau de aumento na temperatura de fornecimento pode representar entre 2% e 4% de poupança no consumo do sistema de arrefecimento. Os data centers que operam a 18 °C estão a desperdiçar dinheiro.

Onde medir a temperatura

A temperatura deve ser medida na entrada de ar de cada equipamento TI, não no corredor frio nem na sala em geral. A temperatura do corredor frio pode diferir significativamente da temperatura de entrada real se existir mistura de ar quente e frio, painéis perfurados mal posicionados ou fugas no piso elevado. A monitorização de temperatura ao nível do rack, na parte frontal de cada unidade TI, é a única medição operacionalmente válida.

Precisão vs. conforto — por que razão o ar condicionado convencional não serve

Um dos erros mais frequentes em instalações pequenas ou em salas de servidores improvisadas é utilizar unidades de ar condicionado de conforto (concebidas para pessoas) para arrefecer equipamentos TI. As diferenças entre os dois sistemas são tão fundamentais que esta decisão pode comprometer completamente a disponibilidade dos equipamentos.

Característica	A/C de conforto	A/C de precisão (CRAC/CRAH)	Impacto operacional
Fluxo de ar	< 100 CFM/kW (insuficiente)	>= 158 CFM/kW	O A/C de conforto não move ar suficiente para dissipar o calor dos servidores
Rácio de calor sensível (SHR)	<= 70%	> 90%	O A/C de conforto 'desperdiça' capacidade em desumidificação em vez de arrefecer
Controlo de HR	Inexistente ou muito básico	Humidificação e desumidificação precisas	Sem controlo de HR, risco de ESD ou corrosão
Redundância interna	Sem componentes redundantes	Compressores redundantes, tolerante a falhas	O A/C de conforto não está concebido para funcionamento 24/7
Velocidade de resposta	Lenta	Rápida, responde em segundos a variações de carga	Os servidores geram picos de calor súbitos que o A/C de conforto não consegue gerir

O custo real do A/C de conforto na sala de servidores

Um sistema de A/C de conforto a funcionar numa sala de servidores não é apenas ineficiente: é ativamente perigoso. A sua incapacidade para mover caudal de ar suficiente garante pontos quentes nos racks, a sua falta de controlo preciso de HR gera risco de ESD ou corrosão, e a ausência de componentes redundantes torna qualquer avaria num evento crítico.

Tecnologias de arrefecimento — da expansão direta ao free cooling

O mercado oferece múltiplas tecnologias para o arrefecimento de data centers, cada uma com as suas vantagens, limitações e gamas de aplicação ótimas. A escolha da tecnologia correta depende da potência a dissipar, da densidade de rack, da localização geográfica, da disponibilidade de água e dos objetivos de eficiência energética.

Expansão direta (DX) — tecnologia base

Os sistemas de expansão direta (Direct Expansion) utilizam um circuito de refrigerante que absorve o calor da sala diretamente na unidade CRAC, comprime-o e expele-o para o exterior através de uma unidade condensadora. É a tecnologia mais difundida em instalações de pequena e média dimensão.

- Componente interior: unidade CRAC (Computer Room Air Conditioner), que contém o compressor, o evaporador e os controlos.
- Componente exterior: unidade condensadora, que rejeita o calor para o

exterior através do ar.

- Vantagem principal: instalação relativamente simples, sem necessidade de central de água gelada.
- Limitação principal: a eficiência diminui significativamente quando a temperatura exterior é elevada; não é a opção mais eficiente para grandes potências.

Água gelada (Chiller) – a solução para grandes potências

Os sistemas de água gelada separam o processo de arrefecimento em dois circuitos independentes: o circuito primário de água gelada, que distribui frio às unidades CRAH na sala de servidores, e o circuito secundário de rejeição de calor, que dissipa o calor para o exterior através de torres de arrefecimento ou condensadores.

- Componente principal: chiller, que produz a água gelada por compressão ou absorção.
- Distribuição na sala: unidades CRAH (Computer Room Air Handler), sem compressor próprio, que trocam calor com a água gelada.
- Rejeição de calor: torres de arrefecimento, condensadores evaporativos ou condensadores de ar.
- Vantagem principal: maior eficiência à escala, possibilidade de free cooling integrado, centralização da manutenção.
- Limitação: maior complexidade, maior investimento inicial, requer sistema de tratamento de água.

CRAC vs. CRAH: a diferença que define o sistema

CRAC (Computer Room Air Conditioner): tem compressor integrado. Sistema autónomo, típico de instalações DX. CRAH (Computer Room Air Handler): sem compressor. Apenas troca calor com a água gelada fornecida pelo chiller. Mais eficiente em grandes instalações, mas dependente do sistema de água gelada. A distinção é crítica para compreender a arquitetura do sistema de arrefecimento.

Free Cooling – arrefecer sem compressores

O free cooling é a estratégia com maior impacto na eficiência energética dos data centers modernos. O seu princípio é simples: em vez de utilizar compressores para produzir frio, aproveita as condições exteriores quando a temperatura ambiente é suficientemente baixa para dissipar o calor sem refrigeração mecânica.

Existem duas modalidades com características muito diferentes:

Modalidade	Princípio	Vantagem	Limitação
Free Cooling Direto (Airside)	Introduz ar exterior frio diretamente na sala, numa única passagem	Eficiência máxima. Sem permutador de calor intermédio. Custo operacional mínimo	O ar exterior entra em contacto direto com os equipamentos: requer filtragem exaustiva. Apenas viável quando a qualidade do ar exterior é aceitável
Free Cooling Indireto	O ar exterior arrefece a água do circuito primário através de um permutador de calor. O ar não entra na sala	O ar exterior nunca contacta com os equipamentos. Válido em ambientes com contaminação exterior. Compatível com sistemas Chiller existentes	Menor eficiência que o direto devido às perdas no permutador. Maior investimento inicial

O número de horas por ano em que o free cooling pode ser ativado (horas de economizador) depende do clima da localização. Em climas temperados do norte da Europa, o free cooling pode cobrir mais de 70% das horas anuais. Em climas quentes mediterrânicos ou tropicais, a percentagem é significativamente menor.

Arrefecimento InRow — levar o frio ao rack

As unidades InRow são uma evolução do arrefecimento de sala para o arrefecimento por fila. Em vez de distribuir ar frio a partir de unidades perimetrais ou no teto, as unidades InRow instalam-se diretamente entre os racks, fornecendo ar frio exatamente onde é necessário e recolhendo o ar quente sem percursos longos.

- Vantagem principal: elimina praticamente a mistura de ar quente e frio. Muito eficaz para densidades de rack elevadas (> 10 kW/rack).
- Conceção da sala: compatível tanto com piso elevado como com piso plano.
- Limitação: maior número de unidades a gerir e manter. Maior custo inicial por unidade de potência.

Arrefecimento líquido direto — o futuro para alta densidade

Para densidades de rack superiores a 20 kW/rack, o ar como meio de transferência de calor deixa de ser suficiente. O arrefecimento líquido direto (Direct Liquid Cooling) leva o líquido refrigerante até ao próprio servidor, trocando calor diretamente na CPU, GPU ou nos módulos de memória. Existem duas abordagens:

- Rear-door heat exchanger: permutador de calor integrado na porta traseira do rack, que recolhe o calor do ar de escape antes de sair para o corredor quente.
- Direct liquid to chip: o líquido circula em placas frias fixadas diretamente aos processadores. Eficiência máxima, mas requer equipamentos especificamente concebidos para este efeito.

Gestão do fluxo de ar — a prática com maior impacto na eficiência

Ter a capacidade de arrefecimento correta é uma condição necessária mas não suficiente. Se o ar frio não chegar à entrada dos equipamentos TI de forma eficiente, e se o ar quente se misturar com o frio antes de ser evacuado, o sistema de arrefecimento trabalha o dobro para conseguir metade do resultado. A gestão do fluxo de ar (Air Management) é a disciplina que resolve este problema.

Os três princípios físicos do fluxo de ar

- O ar frio é mais denso que o ar quente: o ar quente sobe naturalmente e o frio tende a descer. O design do sistema de distribuição deve tirar partido deste comportamento, não combatê-lo.
- O calor deve ser removido da sala de servidores: se o calor não for evacuado eficientemente, acumula-se e recircula, elevando progressivamente a temperatura de entrada nos equipamentos.
- O fluxo de ar é tão importante quanto a capacidade de arrefecimento: o ar frio por si só não arrefece os equipamentos se não chegar à sua entrada ao mesmo ritmo que é consumido. O caudal (CFM) é tão crítico quanto a temperatura do ar fornecido.

Corredor frio / corredor quente — o padrão do setor

A disposição de equipamentos em corredores frios e quentes alternados é a prática de gestão do fluxo de ar mais difundida, suportada pelas normas TIA-942 e BICSI-002. A sua lógica é simples: todos os racks de uma fila orientam a parte frontal (entrada de ar frio) para o mesmo corredor, e a parte traseira (expulsão de ar quente) para o corredor oposto.

As dimensões mínimas dos corredores são:

- Corredor frio: mínimo 4 pés (aprox. 1,2 metros) de largura.
- Corredor quente: mínimo 14 pés (aprox. 4,3 metros) de largura para facilitar a evacuação do calor.

Por que razão funciona o corredor frio/quente

Sem esta disposição, o ar quente expulso pela parte traseira dos racks pode ser aspirado pelos equipamentos do rack em frente, criando um ciclo de recirculação que eleva progressivamente a temperatura de entrada. Com corredores alternados, o ar frio e o quente têm percursos fisicamente separados, eliminando a mistura e permitindo que o sistema de arrefecimento funcione de forma muito mais eficiente.

Contenção de corredores — o nível seguinte de eficiência

A contenção de corredores leva o conceito do corredor frio/quente à sua conclusão lógica: se a separação entre ar frio e quente é boa, conter fisicamente um dos dois corredores é ainda melhor. Existem duas abordagens:

Abordagem	O que se contém	Como funciona	Eficiência relativa
Contenção de corredor frio (CFCC)	O corredor frio fica fechado com painéis e portas	Todo o ar frio do piso elevado vai diretamente para a entrada dos racks, sem possibilidade de mistura com o quente	Elevada. Permite aumentar a temperatura de fornecimento mantendo a temperatura de entrada nos equipamentos
Contenção de corredor quente (HCCC)	O corredor quente fica fechado e liga-se diretamente ao retorno das unidades CRAC/ CRAH	O ar quente vai diretamente para o retorno sem circular pela sala. Controlo máximo da temperatura de retorno	Muito elevada. É a configuração energeticamente mais eficiente na maioria dos cenários

A implementação de contenção de corredores é, em termos de retorno do investimento energético, uma das medidas mais rentáveis disponíveis num data center existente. Em instalações com mistura significativa de ar, pode reduzir o consumo do sistema de arrefecimento entre 15% e 30%.

Três métodos de distribuição do ar frio

Método	Como distribui o ar	Tipo de piso	Caso de utilização típico
Underfloor (sob o piso)	O piso elevado funciona como plenum. Painéis perfurados no corredor frio dirigem o ar para os racks	Piso elevado obrigatório	A distribuição mais difundida. Eficiente para densidades médias (até 10 kW/rack)
Overhead (aéreo)	O ar frio é distribuído por condutas no teto e dirigido para os corredores frios	Compatível com piso plano	Necessário quando não existe piso elevado. Requer um projeto cuidadoso das condutas para evitar pontos quentes
InRow	Unidades de arrefecimento instaladas entre os racks, fornecendo ar frio a distância muito curta dos equipamentos	Compatível com ambos	Densidades elevadas (> 10 kW/rack). Complemento ao sistema perimetral quando a densidade aumenta

Densidade de rack e a sua relação com o sistema de arrefecimento

A densidade de rack é o parâmetro que mais evoluiu nos últimos anos e o que mais pressão exerce sobre os sistemas de arrefecimento tradicionais. A ascensão da computação de alto desempenho, da IA e do machine learning levou a densidade média de rack dos 5–6 kW/rack de há uma década para valores de 20, 30 ou mesmo 100 kW/rack em instalações especializadas.

Classificação por densidade e tecnologia de arrefecimento associada

Densidade	kW/rack	Tipo de equipamento típico	Tecnologia de arrefecimento recomendada
Baixa densidade	Até 5 kW	Servidores 1U, Telco, networking	CRAC/CRAH perimetral com piso elevado padrão
Densidade média	5 – 10 kW	Servidores empresariais, armazenamento	CRAC/CRAH com contenção de corredores
Alta densidade	10 – 20 kW	HPC, armazenamento de alta velocidade	InRow + contenção, ou water-cooled rear door
Densidade muito elevada	> 20 kW	Blade servers, GPU para IA, HPC	Arrefecimento líquido direto (DLC), imersão

O problema do rack misto

Uma sala com racks de densidades muito diferentes (alguns a 3 kW, outros a 15 kW na mesma fila) é um dos cenários mais difíceis de gerir para o sistema de arrefecimento. O sistema dimensiona-se para o pior caso, mas a distribuição do ar não se consegue adaptar dinamicamente. A solução é agrupar os racks por densidade em zonas dedicadas com sistemas de arrefecimento específicos para cada zona.

O PUE como indicador de eficiência do arrefecimento

O PUE (Power Usage Effectiveness) é o indicador padrão de eficiência energética de um data center. Define-se como a energia total consumida pela instalação dividida pela energia consumida pelos equipamentos TI. Um PUE de 1,0 significa que toda a energia vai para os equipamentos TI (impossível na prática); um PUE de 2,0 significa que por cada kWh que os servidores consomem, é consumido mais um kWh adicional na infraestrutura.

O sistema de arrefecimento é o principal responsável pelo PUE na maioria das instalações. As estratégias com maior impacto na sua redução são:

- Elevar a temperatura de fornecimento de ar até ao máximo da gama ASHRAE recomendada (27 °C na entrada do equipamento).
- Implementar free cooling para reduzir ou eliminar o uso de compressores nas horas de temperatura exterior favorável.
- Implementar contenção de corredores para eliminar a mistura de ar e reduzir o caudal necessário.
- Instalar os painéis de obturação em falta nos racks para evitar recirculação interna.
- Auditar o sistema de piso elevado para identificar e selar fugas de ar.

Nível de PUE	Avaliação	Característica típica
< 1,2	Excelente	Free cooling, contenção, alta densidade. Hiperescaladores
1,2 – 1,5	Bom	Contenção de corredores, temperatura elevada de fornecimento
1,5 – 2,0	Melhorável	Sem contenção, temperatura baixa de fornecimento, sem free cooling
> 2,0	Deficiente	Sem gestão de ar, A/C de conforto, sobredimensionamento severo

Conclusão: O arrefecimento como vantagem operacional

O sistema de arrefecimento de um data center não é apenas um serviço auxiliar que mantém a temperatura dentro de gama. É um sistema que determina a disponibilidade, a eficiência energética, o custo operacional e a capacidade de escalar a densidade de computação. Geri-lo com rigor é, no sentido mais literal, uma vantagem competitiva.

Os profissionais que compreendem a psicrometria conseguem antecipar riscos de condensação que outros não veem. Os que conhecem as diferenças entre tecnologias conseguem dimensionar corretamente o sistema desde a fase de projeto. Os que implementam contenção de corredores e otimizam a temperatura de fornecimento transformam essa compreensão em poupanças na fatura elétrica todos os meses.

Os cinco princípios do arrefecimento eficiente

1. A temperatura de referência é a entrada no equipamento TI, não a temperatura da sala. Meça onde importa.
2. O A/C de conforto não é uma alternativa ao A/C de precisão: é um risco operacional documentado.
3. Eleve a temperatura de fornecimento até ao limite da gama recomendada ASHRAE. Cada grau conta.
4. Implemente contenção de corredores antes de adicionar mais unidades de arrefecimento. A eficiência do fluxo de ar tem melhor ROI do que adicionar potência de arrefecimento.
5. Classifique os racks por densidade e atribua tecnologia de arrefecimento específica para cada zona. Um único sistema para densidades mistas é sempre ineficiente..