

SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO COM CIRCUITO FECHADO DE ÁGUA EM DATACENTERS: COMPARAÇÃO ENTRE CHILLERS A AR, CHILLERS A ÁGUA E DRY COOLERS ADIABÁTICOS PARA 1 MW DE TI EM SANTANA DE PARNAÍBA (SP)

Artigo técnico-Executivo — 2ª edição revisada

Baseado em literatura acadêmica, guias técnicos de eficiência energética e publicações especializadas em datacenters

Luis Tossi e Alexandre Kontoyanis

2026

RESUMO

Este artigo explica e compara três arquiteturas de rejeição de calor aplicadas a sistemas de refrigeração com circuito fechado de água para datacenters: chiller de condensação a ar, chiller de condensação a água e dry cooler com suporte adiabático. A análise usa uma carga de TI de 1 MW, 100 racks de 10 kW, sala de dados mantida a 22 °C na altura de dois terços do rack e umidade relativa de 55%, considerando a realidade climática de Santana de Parnaíba, na Região Metropolitana de São Paulo.

A síntese da literatura indica uma tensão recorrente entre energia e água: chillers a água tendem a reduzir consumo elétrico, mas deslocam parte do impacto para consumo evaporativo; chillers a ar simplificam a implantação e praticamente eliminam água de processo, porém aumentam o consumo elétrico anual; dry coolers adiabáticos reduzem compressores e podem ter baixo consumo de água, mas não garantem água fria suficientemente baixa em todas as horas quentes e úmidas para uma sala mantida a 22 °C sem apoio mecânico.

Para a base comparativa adotada, estimam-se consumos anuais de eletricidade de aproximadamente 3.329 MWh para chiller a ar (PUE 1,38), 2.190 MWh para chiller a água (PUE 1,25) e 788 a 1.840 MWh para dry cooler adiabático (PUE 1,09–1,21, conforme necessidade de apoio mecânico). Os valores de PUE não incluem UPS e distribuição elétrica; o PUE real de facility é tipicamente 0,05 a 0,10 superior. O consumo anual de água é estimado em menos de 20 m³ no chiller a ar, aproximadamente 22.000 m³ no chiller a água com torre e 5.000 a 8.000 m³ no dry cooler adiabático.

Esta edição incorpora seis aprimoramentos em relação à versão original: (a) PUE explícito para todos os cenários; (b) nota sobre conservadorismo da eficiência adotada para o chiller a ar frente a equipamentos modernos; (c) discussão sobre análise de carga parcial (bin method); (d) impacto da redundância (N+1 e 2N) no PUE real e no CAPEX; (e) qualidade da

água de abastecimento em Santana de Parnaíba e seu efeito no WUE real; (f) requisitos de ruído e legislação acústica aplicável (CETESB/CONAMA).

Palavras-chave: datacenter; água gelada; chiller; dry cooler; resfriamento adiabático; PUE; WUE; análise de carga parcial; ruído; redundância.

1. INTRODUÇÃO

Datacenters convertem praticamente toda a energia elétrica consumida pelos servidores, storages e equipamentos de rede em calor. Em uma instalação com 1 MW de carga de TI, a sala deve remover continuamente uma potência térmica próxima de 1 MW para manter as condições ambientais dentro da faixa de operação do hardware. Em racks de 10 kW, a configuração de referência possui 100 racks e demanda controle rigoroso de vazão de ar, separação entre corredores frio e quente, controle de umidade e disponibilidade elevada.

A literatura recente converge em três observações. Primeiro, a eficiência do datacenter deve ser avaliada por métricas de energia e água, especialmente PUE (Power Usage Effectiveness) e WUE (Water Usage Effectiveness), pois ganhos de energia podem ser obtidos à custa de evaporação de água. Segundo, as condições climáticas locais alteram fortemente o desempenho anual, porque a temperatura de bulbo seco influencia chillers a ar e dry coolers, enquanto a temperatura de bulbo úmido influencia torres de resfriamento e processos adiabáticos. Terceiro, a escolha tecnológica não pode ser feita apenas pelo COP nominal; deve incluir horas de operação, temperatura de água, abordagem térmica, perdas por bombeamento, ventiladores, tratamento de água, risco operacional e restrições ambientais.

Santana de Parnaíba está inserida na Região Metropolitana de São Paulo, com clima subtropical de altitude, verões quentes e úmidos e invernos mais amenos e relativamente secos. Para fins deste artigo, adota-se como base de engenharia um ponto de projeto externo conservador de 32 °C de bulbo seco e 23 °C de bulbo úmido, típico de seleção preliminar para a região metropolitana, sem substituir estudo horário com TMY/TRY, estação meteorológica validada ou dados ASHRAE Weather Data Viewer. A condição interna solicitada, 22 °C e 55% UR, equivale a uma condição de sala mais restritiva do que muitas instalações modernas que operam dentro das faixas recomendadas e permitidas pela Thermal Guidelines do TC 9.9 da ASHRAE; por isso, ela penaliza alternativas de free cooling que trabalham com água em maior temperatura.

2. BASES TEÓRICAS E FONTES

A base bibliográfica utilizada combina artigos acadêmicos, guias técnicos e literatura especializada. Lei e Masanet (2022) mostram que PUE e WUE são fortemente dependentes do clima e da tecnologia de resfriamento. Xu, Zhang e Wang (2023) revisam sistemas de ar, líquido e free cooling para datacenters e destacam que a elevação de temperatura de operação aumenta o potencial de economia. Chen e Wemhoff (2023) discutem os benefícios de sustentabilidade da economia em sistemas de água gelada. Ndukaiife e Nnanna (2019) analisam o compromisso entre água e energia em sistemas evaporativos híbridos. Silva-Llanca, Ponce e Bermúdez (2023) investigam a influência climática no consumo de energia e água para economização. Van Geet e Sickinger (2024), em guia técnico do NREL/DOE, consolidam boas práticas de projeto energético para datacenters. O guia ASHRAE TC 9.9 é a referência internacional para envelopes térmicos de equipamentos de TI.

As estimativas numéricas deste artigo são apresentadas explicitamente como cálculo de engenharia com premissas declaradas, derivado da física de transferência de calor, de faixas de desempenho publicadas e das relações de evaporação utilizadas na literatura técnica. Elas não substituem simulação energética com EnergyPlus, Modelica, ferramentas de fabricantes ou estudo de engenharia executiva.

3. CONDIÇÕES DE CONTORNO DO ESTUDO

A Tabela 1 apresenta os parâmetros adotados. Em relação à versão anterior, foram acrescentados: (a) nota explícita sobre ausência de redundância na base de comparação e (b) esclarecimento sobre a exclusão de perdas de UPS e distribuição no PUE calculado.

Tabela 1 – Condições de contorno do estudo

Parâmetro	Valor adotado	Observação / Fonte técnica
Carga de TI	1.000 kW	Carga elétrica de TI convertida em calor sensível
Racks	100 racks de 10 kW	Densidade média solicitada
Condição da sala	22 °C e 55% UR	Medição a 2/3 da altura do rack; mais restritiva que faixas recomendadas e permitidas da Thermal Guidelines do TC 9.9 da ASHRAE
Operação anual	8.760 h/ano	Datacenter em regime contínuo
Carga térmica base	1.000 kW térmicos	Sem incluir perdas de UPS e distribuição elétrica (acréscimo típico de +0,05 a +0,10 no PUE)

Clima de referência	32 °C BS / 23 °C BU	Premissa preliminar RMSP; não substitui arquivo TMY/TRY validado
Temperatura de água para CRAH	12/18 °C (chillers); ≥ 26 °C (dry cooler sem apoio)	Define viabilidade do free cooling e do setpoint de sala
Redundância na base comparativa	Sem redundância	N+1 e 2N discutidos na Seção 7.2; impacto no PUE real e no CAPEX

Fonte: elaboração própria.

A energia anual de TI é 8.760 MWh/ano. O WUE local é calculado como litros de água consumidos no **site** divididos por kWh de TI. O WUE de ciclo de vida, que inclui a água usada na geração elétrica, não é abordado neste artigo para não misturar impactos locais com os da matriz elétrica.

4. TECNOLOGIAS ANALISADAS

4.1 Chiller de condensação a ar

No chiller de condensação a ar, o circuito de água gelada é fechado: a água percorre CRAHs (Computer Room Air Handlers), fan-walls ou fan-coils no datahall, absorve calor do ar de retorno e segue ao evaporador do chiller. O refrigerante do chiller rejeita esse calor para o ar externo por meio de serpentinas condensadoras ventiladas. Não há torre de resfriamento e, portanto, não há consumo contínuo de água de processo (apenas em eventuais casos de manutenção ou vazamentos). O principal impacto é elétrico, pois a temperatura de condensação aumenta durante os períodos de calor externo, reduzindo o EER (*Energy Efficiency Ratio*) do compressor.

Do ponto de vista acústico, os condensadores externos geram ruído relevante por meio dos ventiladores. Em projetos em zonas urbanas ou com vizinhança sensível, essa característica deve ser verificada em conformidade com os limites estabelecidos pela legislação ambiental aplicável. Ventiladores do tipo EC com variador de frequência permitem reduzir as emissões sonoras em carga parcial, sem comprometer a eficiência (ver Seção 7.5).

CHILLER DE CONDENSAÇÃO A AR – CIRCUITO FECHADO

Fluxo do refrigerante (circuito fechado) e rejeição de calor para o ar externo

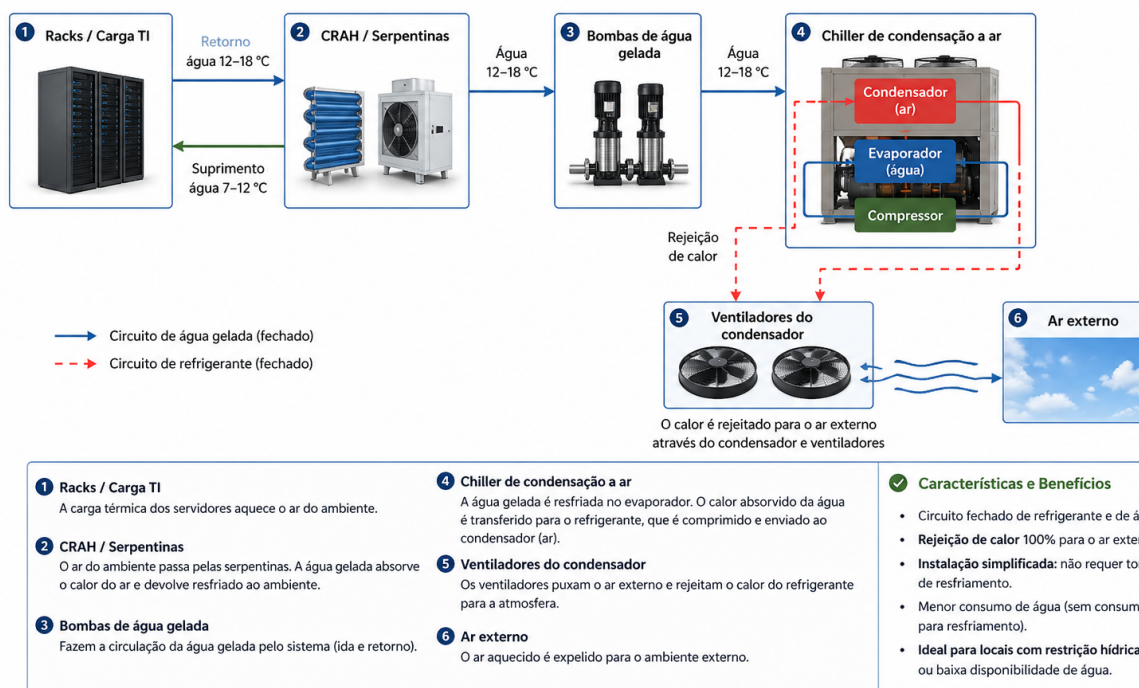


Figura 1 – Diagrama simplificado de circuito fechado com chiller de condensação a ar. Fonte: elaboração própria, com base em ASHRAE TC 9.9, Van Geet e Sickinger (2024) e Xu, Zhang e Wang (2023).

4.2 Chiller de condensação a água

No chiller de condensação a água, o circuito de água gelada do datahall continua fechado, mas o condensador do chiller rejeita calor para um segundo circuito: o circuito de água de condensação. Essa água segue para uma torre de resfriamento, onde parte evapora para resfriar o restante do volume de água. O resultado esperado é maior eficiência do compressor, porque o condensador trabalha próximo ao bulbo úmido exterior (sempre igual ou inferior à temperatura de bulbo seco), porém com consumo significativo de água por evaporação, purga e reposição.

O consumo hídrico é diretamente influenciado pela qualidade da água de abastecimento local. Água de alta dureza reduz os ciclos de concentração viáveis, aumentando a purga e o consumo total. Em Santana de Parnaíba, a qualidade da água fornecida pela SABESP deve ser verificada antes de definir o projeto de tratamento (ver Seção 7.4).

CHILLER DE CONDENSAÇÃO A ÁGUA – CIRCUITO FECHADO

Fluxo do sistema de água gelada, circuito de condensação e rejeição de calor na torre

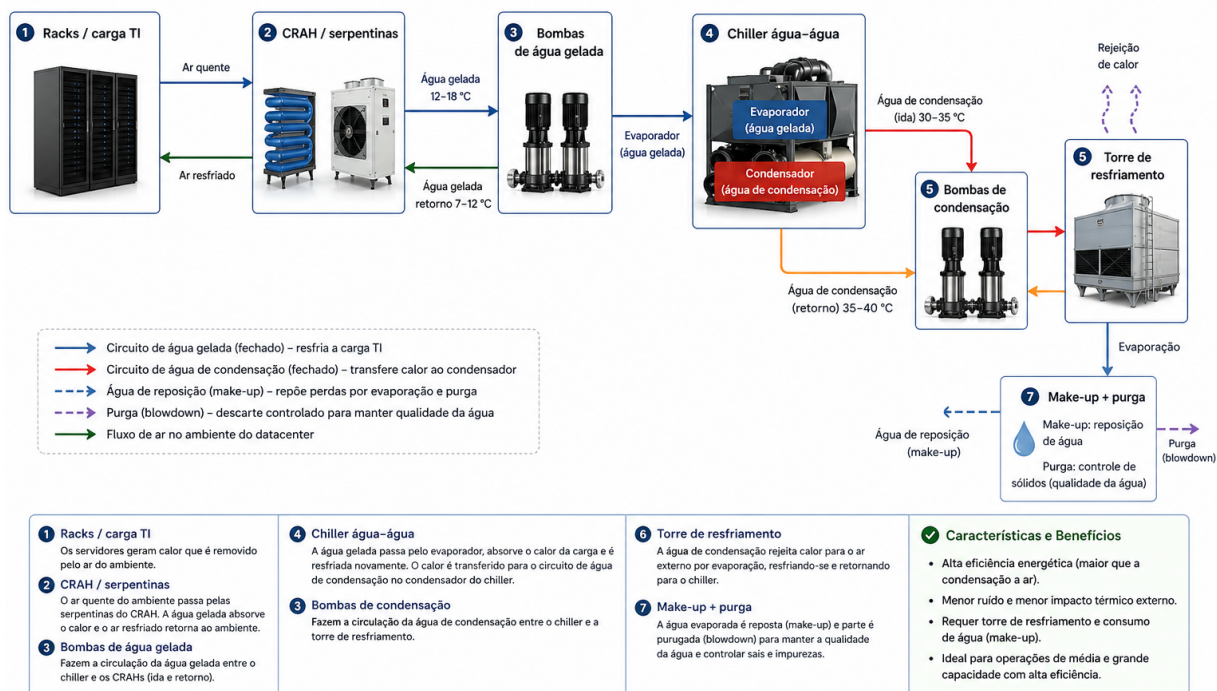


Figura 2 – Diagrama simplificado de circuito fechado com chiller de condensação a água e torre. Fonte: elaboração própria, com base em Ndukaife e Nnanna (2019), Lei e Masanet (2022) e Van Geet e Sickinger (2024).

4.3 Dry cooler com suporte adiabático

O dry cooler é um trocador ar-água instalado externamente. Em operação seca, ventiladores passam ar ambiente por serpentinas fechadas, removendo calor da água sem contato direto entre ar e água do circuito. No suporte adiabático, a entrada de ar é pré-resfriada pela evaporação de água em mídia ou spray controlado antes de alcançar a serpentina. Isso reduz a temperatura de bulbo seco do ar de entrada, aproximando-a da temperatura de bulbo úmido e, por consequência, aumentando a capacidade de resfriamento nos dias quentes. A água do circuito de processo permanece fechada.

A limitação crítica é a temperatura de *approach*. Um dry cooler, mesmo adiabático, não é capaz de resfriar a água abaixo da temperatura exterior, pois há uma ineficiência associada a qualquer trocador de calor (representado pela temperatura de *approach*). Em Santana de Parnaíba, com bulbo úmido de projeto de 23 °C, a temperatura mínima de saída de água em condições de projeto é de aproximadamente 26 a 27 °C (23 °C TBU + *approach* de 3 a 4 °C), insuficiente para CRAHs dimensionados para água a 18 °C de supply. Assim, esta alternativa é muito adequada para sistemas de água morna (≥ 26 °C), rear-door heat exchangers, liquid cooling, setpoints de sala mais elevados ou operação híbrida com chiller de trim.

SISTEMA DE DRY COOLER COM SUPORTE ADIABÁTICO – CIRCUITO FECHADO

Refrigeração por ar com pré-resfriamento adiabático para maior eficiência

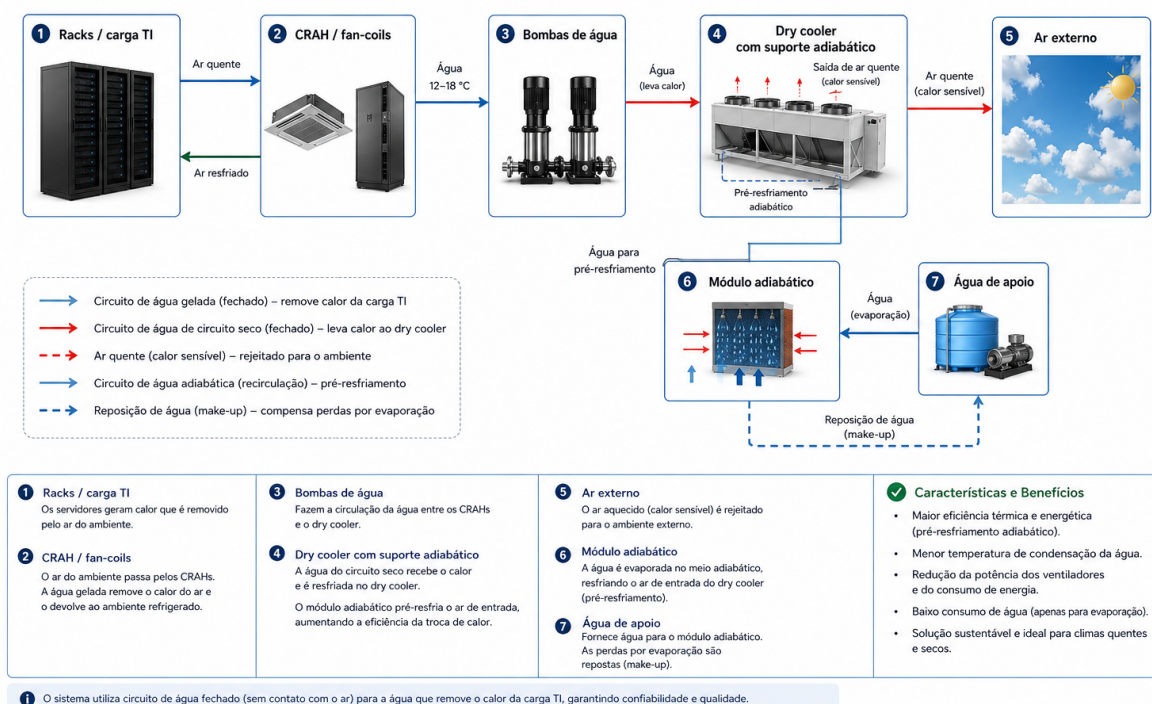


Figura 3 – Diagrama simplificado de circuito fechado com dry cooler adiabático. Fonte: elaboração própria, com base em Mantovan et al. (2022), Chen e Wemhoff (2023) e Van Geet e Sickinger (2024).

5. MÉTODO DE CÁLCULO

A carga térmica a remover foi assumida igual à carga de TI: 1.000 kW. A energia anual da planta de resfriamento é calculada por potência média elétrica multiplicada por 8.760 horas.

Para chillers a ar, adotou-se desempenho anual médio de 0,33 kW/kW para compressores e 0,05 kW/kW para bombas e ventiladores associados, totalizando 0,38 kW/kW (COP global \approx 2,63). Este valor é conservador em relação a equipamentos modernos: chillers a ar com compressores inverter e ventiladores EC disponíveis em 2024–2025 atingem IPLV/NPLV de 3,5 a 4,2 para as condições climáticas de São Paulo, o que corresponderia a uma faixa de 0,24 a 0,29 kW/kW em médias anuais ponderadas. A adoção do valor conservador é metodologicamente defensável como premissa de seleção sem arquivo climático horário, mas implica que a diferença energética entre condensação a ar e a água apresentada neste estudo é maior do que a obtida com equipamentos de geração atual, sendo um aspecto relevante para a tomada de decisão comercial.

Para chillers a água, adotou-se 0,18 kW/kW para compressores e 0,07 kW/kW para bombas, torre e auxiliares, totalizando 0,25 kW/kW. Essas faixas são compatíveis com a

literatura técnica sobre a diferença de desempenho entre condensação a ar e a água quando torres operam com temperaturas próximas ao bulbo úmido.

Para a torre de resfriamento, a água evaporada foi estimada pela relação termodinâmica entre calor rejeitado e calor latente de evaporação (1,5 a 1,7 litro por kWh rejeitado). O calor rejeitado pela torre é a soma da carga de TI com a potência do compressor: $1.000 + 180 = 1.180$ kW. Com 4 ciclos de concentração e purga equivalente a um terço da evaporação, o consumo anual resulta em aproximadamente 16.500 m^3 de evaporação + 5.500 m^3 de purga = 22.000 m^3 . Essa metodologia é coerente com Ndukaiife e Nnanna (2019), Lei e Masanet (2022) e Mishra (2016).

Para o dry cooler adiabático, a potência média seca de bombas e ventiladores foi estimada em $0,09 \text{ kW/kW}$, com faixa adicional de compressor auxiliar de $0,00$ a $0,12 \text{ kW/kW}$ dependendo da temperatura de água aceitável. A água adiabática foi estimada em 5.000 a $8.000 \text{ m}^3/\text{ano}$, operando apenas nas horas quentes e com modulação.

Os valores de PUE foram calculados como $(1.000 \text{ kW TI} + \text{potência da planta de resfriamento}) / 1.000 \text{ kW TI}$. Não estão incluídos UPS, distribuição elétrica interna, iluminação e outros auxiliares, que acrescentam tipicamente $0,05$ a $0,10$ ao PUE calculado. O PUE real de facility deve, portanto, ser considerado superior aos valores tabelados.

A metodologia adota eficiência média anual constante, simplificação necessária na ausência de arquivo climático horário. Uma análise por faixas de temperatura (bin method) com dados TMY para a RMSPP produziria estimativas mais precisas, especialmente para o chiller a ar, que ganha eficiência expressiva nas horas com bulbo seco abaixo de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, condição que representa parcela significativa do ano em Santana de Parnaíba. Uma bin analysis tenderia a reduzir o consumo estimado do chiller a ar e diminuir a diferença energética observada entre as duas alternativas com chiller.

6. RESULTADOS COMPARATIVOS

Os resultados são apresentados em duas tabelas: a Tabela 2 consolida as métricas energéticas, incluindo PUE explícito; a Tabela 3 apresenta as métricas hídricas. Os valores são indicativos e devem ser refinados com arquivo climático horário, curvas reais de fabricantes, redundância, temperatura de água gelada, estratégia de contenção e critérios de disponibilidade.

Tabela 2 – Métricas energéticas por tecnologia de rejeição de calor

Tecnologia	kW/kW total	Pot. média (kW)	Energia/ano (MWh)	PUE estimado ¹
Chiller de condensação a ar	0,38	380	3.329	1,38
Chiller de condensação a água	0,25	250	2.190	1,25
Dry cooler adiabático — sem apoio mecânico *	0,09	90	788 *	1,09 *
Dry cooler adiabático — com apoio mecânico parcial	0,13–0,21	130–210	1.139–1.840	1,13–1,21

¹ $PUE = (1.000 \text{ kW TI} + \text{potência da planta de resfriamento}) / 1.000 \text{ kW TI}$. Não inclui UPS, distribuição elétrica, iluminação e outros auxiliares. O PUE real de facility é tipicamente 0,05 a 0,10 superior.

* Sem apoio mecânico, o dry cooler adiabático não garante água a 12/18 °C com bulbo úmido de projeto de 23 °C em Santana de Parnaíba (temperatura mínima termodinâmica $\approx 26\text{--}27$ °C). O valor de 788 MWh e PUE 1,09 aplicam-se exclusivamente a sistemas de água morna (supply ≥ 26 °C), como direct liquid cooling e rear-door heat exchangers. Para a condição interna de 22 °C com CRAHs convencionais de 12/18 °C, utilizar obrigatoriamente a linha com apoio mecânico parcial.

Tabela 3 – Métricas hídricas por tecnologia de rejeição de calor

Tecnologia	Água/ano (m ³)	WUE local (L/kWh TI)	Comentário
Chiller de condensação a ar	< 20	~0,002	Mínimo consumo hídrico; apenas reposição de circuito fechado
Chiller de condensação a água	~22.000	~2,5	Alto consumo evaporativo + purga; sensível à dureza da água local
Dry cooler adiabático (com ou sem apoio mecânico)	5.000–8.000	0,57–0,91	Consumo apenas nas horas quentes; circuito de processo fechado; sem risco de Legionella no circuito principal

Fonte: elaboração própria. $WUE \text{ local} = L \text{ de água consumida no sítio} / kWh \text{ de TI}$. Não inclui água de ciclo de vida.

As Tabelas 2 e 3 evidenciam que não existe solução universal. O chiller a ar é atrativo quando a prioridade é reduzir risco hídrico, simplificar licenciamento e evitar tratamento de torre e sua desvantagem energética em relação a equipamentos modernos é menor do que os valores conservadores adotados sugerem. O chiller a água é atrativo quando há disponibilidade hídrica e foco em eficiência elétrica. O dry cooler adiabático é atrativo para sistemas de água morna ou operação híbrida, mas exige validação hora a hora para manter a condição interna especificada de 22 °C.

7. DISCUSSÃO TÉCNICA

Com a carga de 1 MW de TI, cada 0,01 kW/kW de eficiência da planta representa 87,6 MWh/ano. Portanto, diferenças aparentemente pequenas entre COPs têm impacto relevante no OPEX, na capacidade elétrica contratada e nas emissões indiretas de carbono. Em regiões com eletricidade cara ou restrição de conexão, o chiller a água pode apresentar vantagem econômica. Contudo, o consumo de aproximadamente 22.000 m³/ano para a base de 1 MW equivale a cerca de 60 m³/dia, antes de considerar redundância, degradação e variações climáticas. Em contexto de estresse hídrico, esse número pode ser decisivo.

A condição interna de 22 °C e 55% UR é confortável para operação de TI, mas conservadora em relação a práticas modernas. A ASHRAE TC 9.9 permite faixas operacionais mais amplas para diversas classes de equipamentos, e muitos operadores trabalham com temperaturas de insuflamento superiores a 22 °C mantendo a entrada dos servidores dentro do envelope recomendado. Elevar o setpoint de água ou de ar aumenta expressivamente as horas de dry cooling, reduzindo energia e água.

7.1 Desempenho em Carga Parcial e Análise por Bins

A análise apresentada adota eficiência média anual constante, simplificação necessária para comparação sem arquivo climático horário. Chillers a ar são particularmente sensíveis à temperatura de bulbo seco: nas horas em que a temperatura externa cai abaixo de 25 °C, a temperatura de condensação reduz e o COP eleva-se expressivamente. Em Santana de Parnaíba, dados históricos para a RMSP indicam que a temperatura de bulbo seco permanece abaixo de 27 °C em aproximadamente 5.000 a 6.000 horas anuais, condição em que chillers a ar modernos com controle de condensação flutuante e compressores de velocidade variável atingem COPs acima de 4,0.

Uma análise bin com arquivo TMY/TRY da RMSP reduziria a estimativa de consumo do chiller a ar (atualmente 3.329 MWh/ano) e diminuiria a diferença energética observada na comparação com o chiller a água. Recomenda-se que estudos de engenharia básica apliquem o bin method ou simulação horária, utilizando ferramentas como EnergyPlus, Carrier HAP ou Trane TRACE, adequadas para essa finalidade.

7.2 Impacto da Redundância

Os resultados das Tabelas 2 e 3 consideram operação sem redundância. Datacenters comerciais operam tipicamente em configuração N+1 (um equipamento de reserva por grupo)

ou 2N (planta duplicada), conforme requisito de disponibilidade e classificação de site pela metodologia Uptime Institute (Tier II, III ou IV).

Em configuração N+1 com dois chillers de 600 kW cada, a operação estrutural em carga parcial melhora a eficiência e o consumo de energia pode ser ligeiramente inferior ao calculado. Em configuração 2N, o consumo elétrico em stand-by dos equipamentos redundantes eleva o PUE efetivo em 0,03 a 0,08. O CAPEX difere significativamente entre as três alternativas: o chiller a ar dispensa torre, tratamento de água e reservatório de reposição; o dry cooler com apoio mecânico demanda dois sistemas distintos (compressor auxiliar + dry cooler), com maior complexidade de integração e ponto de falha adicional a ser considerado no plano de manutenção.

7.3 Sustentabilidade: PUE, WUE e Emissões

Do ponto de vista de sustentabilidade, a melhor decisão não é minimizar apenas o PUE. Lei e Masanet (2022) demonstram que WUE e PUE variam simultaneamente com tecnologia e clima. Chen e Wemhoff (2023) reforçam que economização em água gelada pode reduzir pegadas de carbono e de escassez hídrica, mas os benefícios são dependentes do local. Em Santana de Parnaíba, o equilíbrio deve considerar disponibilidade de água, custo de energia, licenciamento ambiental, ruído externo, ocupação urbana e resiliência a ondas de calor.

7.4 Qualidade da Água de Abastecimento em Santana de Parnaíba

O chiller de condensação a água depende de tratamento contínuo da água de torre. A qualidade da água fornecida pela SABESP na RMSP apresenta variações sazonais de dureza, pH e sólidos dissolvidos totais. A dureza, frequentemente acima de 100 mg/L de CaCO₃ em determinados pontos da rede, reduz os ciclos de concentração práticos de 4 para 3 ou mesmo 2, aumentando o consumo de purga e, portanto, o WUE real do site.

Em regiões ou períodos com dureza acima de 200 mg/L de CaCO₃, o consumo anual de água de reposição pode superar a estimativa de 22.000 m³ em 20 a 40%, dependendo do regime de tratamento adotado. Recomenda-se análise laboratorial completa da água de abastecimento antes de definir o projeto de tratamento da torre, contemplando inibidores de incrustação e corrosão, biocidas para controle de Legionella e estratégia de purga. A recuperação de purga para reuso em irrigação de áreas verdes ou bacias sanitárias pode reduzir o WUE efetivo do site e contribuir para o atendimento de critérios de certificação ambiental (LEED, EDGE).

7.5 Ruído e Legislação Acústica

Chillers de condensação a ar e dry coolers geram carga acústica relevante pelos ventiladores externos, especialmente em operação noturna ou com alta demanda térmica. Em Santana de Parnaíba, inserida em contexto urbano-industrial na RMSP, a emissão sonora dos equipamentos externos está sujeita à Decisão de Diretoria CETESB nº 215/2007 (que regulamenta a Resolução CONAMA nº 01/1990), além de eventuais restrições do Plano Diretor Municipal.

Para datacenters instalados em zonas de uso industrial, o limite típico é de 70 dB(A) diurno e 60 dB(A) noturno, medido a 1 metro da divisa do empreendimento. Chillers de condensação a ar para carga equivalente a 1 MW de TI, com múltiplos condensadores externos, podem exigir atenuação acústica adicional, com baffles direcionais, orientação estratégica dos ventiladores, distância mínima da divisa para cumprimento dos limites, o que afeta o layout externo e o CAPEX da solução.

O chiller de condensação a água rejeita calor principalmente pela evaporação na torre, com menor contribuição acústica dos condensadores, mas com risco de emissão de vapor visível e gotículas em dias frios que pode gerar reclamações de vizinhos. O dry cooler opera com ventiladores de maior área em rotações mais baixas, produzindo espectro sonoro geralmente mais favorável. Em qualquer caso, o estudo de impacto de vizinhança deve incluir simulação acústica desde a fase de anteprojeto.

8. RECOMENDAÇÕES DE PROJETO

Para um datacenter de colocation ou hyperscale em Santana de Parnaíba com 1 MW inicial, as recomendações por tecnologia são apresentadas a seguir.

8.1 Chiller de condensação a ar

Solução robusta quando a prioridade é baixo consumo hídrico, simplicidade operacional e ausência de infraestrutura de tratamento de água. Recomenda-se selecionar equipamentos de alta eficiência com IPLV/NPLV superior a 3,5, compressores inverter, ventiladores EC com VFD e controle por temperatura de condensação flutuante. O arranjo N+1 melhora a eficiência em carga parcial e a disponibilidade operacional.

Sob a perspectiva acústica, verificar os limites de emissão previstos na Decisão de Diretoria CETESB nº 215/2007 e na legislação municipal de zoneamento. Ventiladores EC com variação de velocidade produzem menores níveis de ruído em carga parcial, especialmente em horários noturnos, melhorando a conformidade sem comprometer a eficiência. A disposição

dos condensadores deve ser estudada em relação à divisa do terreno e a eventuais edificações sensíveis nas proximidades.

8.2 Chiller de condensação a água

Deve ser considerado quando houver segurança de abastecimento hídrico e quando o custo ou o limite de conexão elétrica justificar a troca de energia por consumo de água. Recomenda-se maximizar os ciclos de concentração com tratamento adequado, recuperar purgas para reuso, medir WUE em tempo real e incluir plano sanitário rigoroso para controle de Legionella.

Antes de especificar, realizar análise laboratorial da água da SABESP para verificar dureza, pH, condutividade e sólidos dissolvidos. Água com dureza acima de 150 mg/L de CaCO_3 exige abrandamento ou controle químico intensivo; sem isso, os ciclos de concentração reais podem ser inferiores ao projetado, elevando o WUE e o custo de tratamento. Incluir no custo operacional: reagentes químicos, descarte de purga, monitoramento microbiológico mensal e manutenção preventiva da torre a cada 6 meses.

8.3 Dry cooler com suporte adiabático

Alternativa de alto potencial, especialmente para projetos que adotam temperatura de água mais elevada (água morna, supply ≥ 26 °C), rear-door heat exchangers, direct liquid cooling ou estratégia híbrida. Para manter 22 °C no datahall com CRAHs convencionais (12/18 °C), é obrigatória simulação horária e avaliação de chiller de trim dimensionado para as horas críticas de verão.

Em qualquer configuração, verificar o espectro de ruído dos ventiladores em plena carga e em modulação; confirmar a disponibilidade de água de boa qualidade para o módulo adiabático (risco de incrustação na mídia evaporativa) e prever manutenção preventiva da mídia a cada 12 a 18 meses. O isolamento hidráulico do circuito principal é uma vantagem em relação à torre aberta, pois elimina o risco de Legionella no circuito de processo.

9. CONCLUSÃO

A análise mostra que os três sistemas são tecnicamente viáveis como arquiteturas de circuito fechado de água, mas não entregam o mesmo equilíbrio entre energia, água e garantia térmica. O chiller de condensação a ar é a alternativa de menor consumo hídrico local e maior simplicidade, ao custo de maior energia elétrica, custo esse que é menor do que os valores

conservadores adotados sugerem quando equipamentos modernos de alta eficiência são selecionados e a análise por bins é aplicada. O chiller de condensação a água é a alternativa de menor energia entre os chillers analisados, mas apresenta consumo hídrico elevado e sensível à qualidade da água local, que pode elevar o WUE real em 20 a 40% em relação ao estimado quando a dureza for alta. O dry cooler com suporte adiabático reduz compressores e pode operar com consumo de água significativamente menor que uma torre, porém sua capacidade de manter 22 °C na sala depende da temperatura de água exigida, da condição de bulbo úmido e da existência de apoio mecânico.

Para Santana de Parnaíba, a recomendação técnica é não especificar dry cooler adiabático isolado para água gelada convencional (12/18 °C) sem simulação horária validada; para água morna ou resfriamento líquido, ele pode ser a alternativa mais eficiente. Em qualquer cenário, a decisão deve combinar PUE, WUE, disponibilidade hídrica, confiabilidade, custo total de propriedade e envelope térmico permitido pelo hardware.

A avaliação completa de engenharia deve incluir simulação energética com arquivo climático horário, curvas reais de fabricantes, análise de redundância conforme o Tier alvo (Uptime Institute), estudo acústico conforme CETESB e análise laboratorial da água de abastecimento local, fatores que, em conjunto, podem alterar significativamente os números aqui apresentados e determinar a viabilidade técnico-econômica de cada alternativa.

A decisão final, portanto, transcende a análise técnica: envolve estratégia hídrica, posicionamento de sustentabilidade e o modelo de negócio do operador.

REFERÊNCIAS

ASHRAE. (2021). Thermal Guidelines for Data Processing Environments. 5th ed. Atlanta: ASHRAE TC 9.9.

CETESB. (2007). Decisão de Diretoria nº 215/2007/E/C/I. São Paulo: CETESB.

Chen, L., & Wemhoff, A. P. (2023). The sustainability benefits of economization in data centers containing chilled water systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 194, 106996. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106996>

CONAMA. (1990). Resolução CONAMA nº 01, de 8 de março de 1990. Brasília: Ministério do Meio Ambiente.

Lei, N., & Masanet, E. (2022). Climate- and technology-specific PUE and WUE estimations for US data centers using a hybrid statistical and thermodynamics-based approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 182, 106323. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106323>

Mantovan, M., Bissaro, C., & Poletto, F. (2022). Development of an energy analysis tool for data center free cooling technologies modelization and comparison in different climate conditions. *CLIMA 2022 Conference Proceedings*. <https://proceedings.open.tudelft.nl/clima2022/article/view/393>

Mishra, R. (2016). Evaluation of water consumption and savings achieved in datacenters through air side economization. University of Texas at Arlington. https://mavmatrix.uta.edu/mechaerospace_theses/777/

Ndukaife, T. A., & Nnanna, A. G. A. (2019). Optimization of water consumption in hybrid evaporative cooling air conditioning systems for data center cooling applications. *Heat Transfer Engineering*, 40(15), 1235–1250. <https://doi.org/10.1080/01457632.2018.1436418>

Patterson, M. K., Krishnan, S., & colleagues. (2016). On energy efficiency of liquid cooled HPC datacenters. 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. <https://doi.org/10.1109/ITHERM.2016.7517615>

Silva-Llanca, L., Ponce, C., & Bermúdez, E. (2023). Improving energy and water consumption of a data center via air free-cooling economization: The effect of weather on its performance. *Energy Conversion and Management*, 288, 117106. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117106>

The Green Grid. (2011). Water Usage Effectiveness (WUE): A green grid data center sustainability metric. White Paper #35. <https://www.thegreengrid.org/>

Uptime Institute. (2023). Global Data Center Survey: water, energy and sustainability considerations for digital infrastructure. Uptime Institute Intelligence. <https://uptimeinstitute.com/>

Van Geet, O., & Sickinger, D. (2024). Best practices guide for energy-efficient data center design. National Renewable Energy Laboratory / U.S. Department of Energy. <https://www.osti.gov/biblio/2417618>

Xu, S., Zhang, H., & Wang, Z. (2023). Thermal management and energy consumption in air, liquid, and free cooling systems for data centers: A review. *Energies*, 16(3), 1279. <https://doi.org/10.3390/en16031279>