

**EFEITOS DA MANUTENÇÃO EM CHILLERS DA CENTRAL DE ÁGUA
GELADA:**

ESTUDO DE CASO DE EMPRESA NO SEGMENTO FINANCEIRO

FELIPE AUGUSTO SÁ

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**EFEITOS DA MANUTENÇÃO EM CHILLERS DA CENTRAL DE ÁGUA
GELADA:
ESTUDO DE CASO DE EMPRESA NO SEGMENTO FINANCEIRO.**

FELIPE AUGUSTO SÁ

Orientador: Prof. Dr. Antonio Cesar Pinho Brasil Junior

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

BRASÍLIA-DF

2025

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓSGRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**EFEITOS DA MANUTENÇÃO EM CHILLERS DA CENTRAL DE ÁGUA
GELADA:
ESTUDO DE CASO DE EMPRESA NO SEGMENTO FINANCEIRO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.

APROVADA POR:

Prof. Dr. Antonio Brasil (ENM-UnB)
(Orientador)

Prof. Dr. Rafael Castilho Faria Mendes (ENM-UnB)
(Coorientador)

Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noletto (ENM-UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Dr. Glauber Cruz (UFMA)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA-DF
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

SÁ, FELIPE AUGUSTO.

Efeitos da Manutenção em *Chillers* da Central de Água Gelada: Estudo de Caso de Empresa no Segmento Financeiro, [Distrito Federal], 2025.

73p.210x297mm (PPGCM/FT/Unb, Mestre, Ciências Mecânicas, 2025).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas.

- | | |
|----------------------------|------------------------------------|
| 1. Capacidade Energética. | 2. Central de Água Gelada. |
| 3. Eficiência Operacional. | 4. Manutenção em <i>Chillers</i> . |

I.ENM/FT/UnbII.Brasília

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SÁ, F.A., Efeitos da Manutenção em *Chillers* da Central de Água Gelada: Estudo de Caso de Empresa no Segmento Financeiro. Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, 74p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Felipe Augusto Sá.

TÍTULO: Efeitos da Manutenção em *Chillers* da Central de Água Gelada: Estudo de Caso de Empresa no Segmento Financeiro.

GRAU: Mestre. ANO: 2025.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

FELIPE AUGUSTO SÁ

*"A experiência é o nome que damos aos nossos erros."
(Oscar Wilde)*

RESUMO

A manutenção é fundamental para o funcionamento eficiente de sistemas mecânicos, pois garante sua operação contínua e confiável ao longo do tempo. No contexto específico dos *chillers*, equipamentos fundamentais para o controle térmico em diversas aplicações industriais e comerciais, a aplicação de estratégias de manutenção emerge como uma estratégia eficaz para maximizar sua vida útil e minimizar custos operacionais. O propósito deste estudo é examinar o problema de pesquisa identificado a seguir: Trata-se de um estudo de caso real, a fim de verificar quais são os efeitos da implementação de estratégias de manutenção na capacidade operacional dos *chillers*, e qual é o potencial de redução de custos operacionais proporcionado pela adoção de manutenção em *chillers*? Quanto à hipótese, observa-se que a adoção de estratégias de manutenção em sistemas de *chillers* pode aumentar a confiabilidade operacional, bem como reduzir o tempo de inatividade não planejado, e consequentemente, melhorar a produtividade da organização.

Palavras-chave: Manutenção; *Chillers*; Eficiência operacional; Redução de custos; Refrigeração.

ABSTRACT

Maintenance is essential for the efficient operation of mechanical systems, as it ensures their continuous and reliable performance over time. In the specific context of chillers—key equipment for thermal control in various industrial and commercial applications—the implementation of maintenance strategies emerges as an effective approach to maximize their lifespan and minimize operational costs. The purpose of this study is to examine the research problem identified as follows: This is a real case study aimed at verifying the effects of implementing maintenance strategies on the operational capacity of chillers and assessing the potential for reducing operational costs through the adoption of maintenance practices in chillers. Regarding the hypothesis, it is observed that adopting maintenance strategies in chiller systems can increase operational reliability, reduce unplanned downtime, and consequently improve organizational productivity.

Keywords: Predictive; Chillers; Operational efficiency; Cost reduction; Refrigeration.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PROCESSO DE RESFRIAMENTO (CICLO BÁSICO DE REFRIGERAÇÃO).....	17
FIGURA 2 - PROCESSO DE RESFRIAMENTO POR COMPRESSÃO.....	18
FIGURA 3 - CHILLER CENTRÍFUGO MAGNÉTICO RESFRIADO À ÁGUA	19
FIGURA 4 - DIAGRAMA DE CHILLER REFRIGERADO À ÁGUA.	19
FIGURA 5 - EMISSÕES GLOBAIS DE GASES DE EFEITO ESTUFA POR SETOR ECONÔMICO.....	26
FIGURA 6 - DATA CENTER DA EMPRESA X – AMBIENTE INTERNO – CHILLER CENTRIFUGO.	32
FIGURA 7 - MONITORAMENTO BMS DA CENTRAL DÍVIDA CAG1 E CAG2.....	33
FIGURA 8 - DATA CENTER DA EMPRESA X – AMBIENTE INTERNO – CHILLER PARAFUSO.....	26
FIGURA 9 - PONTO DA CONDIÇÃO EXTERNA NA CARTA PSICROMÉTRICA.....	40
FIGURA 10 -TBU MÁXIMA DA REGIÃO, ASHRAE FUNDAMENTALS 2021.....	33
FIGURA 11 - CAG 1: CONSUMO REFRIGERAÇÃO X ENERGIA ELÉTRICA – PRÉ LIMPEZA CONDENSADORES.....	53
FIGURA 12 -CAG 1: CONSUMO REFRIGERAÇÃO X ENERGIA ELÉTRICA – PÓS LIMPEZA CONDENSADORES.....	54
FIGURA 13 -CAG 1: CONSUMO REFRIGERAÇÃO X ENERGIA ELÉTRICA – JULHO DE 2023 A JULHO 2024.....	54
FIGURA 14- CAG 2: CONSUMO REFRIGERAÇÃO X ENERGIA ELÉTRICA – PRÉ-LIMPEZA CONDENSADORES.....	55
FIGURA 15 - CAG 2: CONSUMO REFRIGERAÇÃO X ENERGIA ELÉTRICA – PÓS LIMPEZA CONDENSADORES.....	56
FIGURA 16 - CAG 2: CONSUMO REFRIGERAÇÃO X ENERGIA ELÉTRICA – JULHO 2023 A JULHO 2024.....	56
FIGURA 17 - CARGA TÉRMICA ABRIL 2024 – PRÉ LIMPEZA DOS CONDENSADORES.....	57
FIGURA 18 - CONSUMO ENERGIA ELÉTRICA ABRIL 2024 PRÉ LIMPEZA DOS CONDENSADORES.	58
FIGURA 19 -CONSUMO ÁGUA CAG 1 ABRIL 2024 – PRÉ-LIMPEZA DOS CONDENSADORES..	58
FIGURA 20 - CARGA TÉRMICA JUNHO 2024 – PÓS LIMPEZA DOS CONDENSADORES.	59
FIGURA 21 - DATA CENTER DA EMPRESA X – AMBIENTE INTERNO – CHILLER CENTRIFUGO.	59
FIGURA 22 -CONSUMO ENERGIA ELÉTRICA JUNHO 2024 – PÓS LIMPEZA DOS CONDENSADORES	60
FIGURA 23 -CARGA TÉRMICA MARÇO 2024 – PRÉ LIMPEZA DOS CONDENSADORES.....	61
FIGURA 24 - CONSUMO ENERGIA ELÉTRICA MARÇO 2024 – PRÉ LIMPEZA DOS CONDENSADORES	61
FIGURA 25 - CONSUMO ÁGUA CAG 2 MARÇO 2024 – PRÉ LIMPEZA DOS CONDENSADORES	62
FIGURA 26 -CARGA TÉRMICA MAIO 2024 – PÓS LIMPEZA DOS CONDENSADORES.....	62
FIGURA 27 - CONSUMO ENERGIA ELÉTRICA MAIO 2024 – PÓS LIMPEZA DOS CONDENSADORES..	63
FIGURA 28 - CONSUMO ÁGUA CAG 2 MAIO 2024 – PÓS LIMPEZA DOS CONDENSADORES.	63
FIGURA 29 - CARGA TÉRMICA E CONSUMO DE ÁGUA.....	64
FIGURA 30 - COMPARATIVO APPROACH CHILLER 2 x RLA.....	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - AFERIÇÕES DA TEMPERATURA DA ÁGUA NA BACIA DAS TORRES DE ARREFECIMENTO.....	37
TABELA AREFECIMENTO DA TEMPERATURA EXTERNA DO AR.....	37
TABELA 3 - AFERIÇÕES CENTRAIS DE ÁGUA GELADA EM CARGA MÁXIMA, OPERANDO INDIVIDUALMENTE.....	38
TABELA 4 - AFERIÇÕES CENTRAIS DE ÁGUA GELADA EM CARGA MÁXIMA, OPERANDO CONJUNTAMENTE COM TODAS AS TORRES DE RESFRIAMENTO EM OPERAÇÃO.....	38
TABELA 5 - AFERIÇÕES CHILLERS EM CARGA MÁXIMA, OPERANDO CONJUNTAMENTE COM TEMPERATURA DE ENTRADA DA ÁGUA DE CONDENSAÇÃO.....	39
TABELA 6 - MÁXIMAS CAPACIDADES CORRIGIDAS PARA CADA CHILLER, OPERANDO INDIVIDUALMENTE.....	42
TABELA 7 - CAPACIDADES DAS CAGs COM TODAS AS TORRES DE RESFRIAMENTO EM OPERAÇÃO.....	43
TABELA 8: CAPACIDADE DAS CAGs COM AS LIMITAÇÕES NAS TORRES DE RESFRIAMENTO PARA AUMENTAR A TEMPERATURA DA ÁGUA DE CONDENSAÇÃO.....	44
TABELA 9 – RESULTADO DA PERFORMANCE DA CAG.....	45
TABELA10– COMPARATIVO APPROACH.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASHRAE	-American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CAG	-Centrais de Água Gelada
CFD	-Computational Fluid Dynamics
PMOC	-Plano de Manutenção, Operação e Controle
TICs-	Tecnologias da Informação e da Comunicação
URL	-Unidade Resfriador de Líquido
BMS	-Business Service Management
DC	-Data center
F	-Frequência
H	-Horas
L	-Litros
M	-METRO
MCA	-Metros de coluna de água
MM	-Milímetro
P	-Pressão
Q	-CAPACIDADE TÉRMICA
UR	-Umidade Relativa
S	-Segundo
T	-Temperatura
TR	-Tonelada de Refrigeração
TBS	- Temperatura de Bulbo Seco
TBU	-Temperatura de Bulbo Úmido
$\dot{m}$	-Vazão mássica
Cp ou Cv	-Calor Específico da Água
$Q_{conj,torres}$	-Capacidade Térmica Máxima do Conjunto de 4 Torres
Q_{inst}	-Capacidade Térmica Instantânea
$Q_{máx}$	-Capacidade Térmica Máxima
Q_{URL}	- Capacidade Térmica das Unidades Resfriadores de Líquido
T	-Tempo
$T_{ent,ac}$	- Temperatura de Entrada da Água de Condensação
$T_{ent,ag}$	-Temperatura de Entrada da Água Gelada

$T_{sai, ac}$	-Temperatura de Entrada da Água de Condensação
$T_{sai, ag}$	-Temperatura de Saída da Água Gelada
$TBSar, ext$	- Temperatura de Seco Úmido do Ar Externo
$TBSar, ext, máx$	-Máxima Temperatura de Bulbo Seco do Ar Externo
$TBUar, adm$	-Temperatura de Bulbo Úmido do Ar de Admissão das Torres
$TBUar, ASHRAE, n=50$	-Temperatura de Bulbo Úmido Determinada pela ASHRAE
$TBUar, ext, máx$	-Máxima Temperatura de Bulbo Úmido do Ar Externo
$TBU_{\text{água}}, bacia$	-Temperatura de Bulbo Úmido da Água na Bacia da Torre
$TBU_{\text{água}}, méd$ Torres	-Temperatura de Bulbo Úmido Média da Água na Bacia das Torres
$URar, adm$	- Umidade Relativa do Ar de Admissão das Torres
$URar, ext$	-Umidade Relativa do Ar externo
$^{\circ}C$	-Graus Celsius
ΔT	-Gradiente de Temperatura
RLA	- Rated Load Amperage

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2 HIPÓTESE	15
1.3 JUSTIFICATIVA	15
1.4 OBJETIVOS.....	16
1.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
1.5.1 O QUE É O CHILLER E AS ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO.....	17
1.5.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E SUSTENTABILIDADE: OPORTUNIDADES E DESAFIOS ASSOCIADOS AO PROCESSO EVOLUTIVO TECNOLÓGICO.....	23
1.5.3 Tecnologia, sociedade e economia.....	24
1.5.4 Consumo de energia elétrica: visão geral	25
1.6 METODOLOGIA	29
2 ESTUDO DE CASO NA EMPRESA DO SEGMENTO FINANCEIRO	31
2.1 APRESENTAÇÃO INICIAL DO CASO	31
2.2 SITUAÇÃO-PROBLEMA: AVALIAÇÃO SOBRE A CAPACIDADE DA CENTRAL DE ÁGUA GELADA REFERENTE.....	34
3 ANÁLISE	36
3.1 REDUÇÃO NA CAPACIDADE DE REJEIÇÃO DE CALOR DOS CHILLERS PARA O SISTEMA DE CONDENSAÇÃO	46
3.2 LIMITAÇÃO NA CAPACIDADE DE REJEIÇÃO DE CALOR DO SISTEMA DE CONDENSAÇÃO PARA A ATMOSFERA EM RELAÇÃO AO ESPECIFICADO EM PROJETO	47
4 DISCUSSÃO E RESULTADOS.....	49
4.1 LIMPEZA QUÍMICA DOS CHILLERS.....	50
4.2 CONSUMO REFRIGERAÇÃO TR X ENERGIA ELÉTRICA KW	52
4.3 CAG 1 - CONSUMO DE REFRIGERAÇÃO TR X CONSUMO DE ÁGUA M³.....	57
4.4 CAG 2 - CONSUMO DE REFRIGERAÇÃO TR X CONSUMO DE ÁGUA M³.....	61
4.5 CONSOLIDADO ENTRE CARGA TÉRMICA E CONSUMO DE ÁGUA	64
4.6 RELAÇÃO APPROACH X RLA	65
CONCLUSÃO.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

INTRODUÇÃO

A aplicação de métodos de manutenção de forma adequada é fundamental para a eficácia operacional de sistemas mecânicos, a fim de assegurar sua funcionalidade ininterrupta e confiável ao decorrer do tempo. No caso da manutenção em *chillers* – vitais para a regulação de temperatura em diversas áreas industriais e comerciais –, a implementação de práticas de manutenção destaca-se como uma estratégia eficiente para prolongar a durabilidade e reduzir despesas operacionais. Essa técnica de manutenção depende da avaliação contínua sobre as condições do equipamento, o que facilita a detecção antecipada de possíveis defeitos e a organização de reparos programados, e previne paradas abruptas que poderiam causar grandes perdas produtivas.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O sistema de refrigeração é essencial para garantir a estabilidade térmica em ambientes críticos, como data centers, hospitais e indústrias, evitando o superaquecimento de equipamentos e assegurando a continuidade operacional. A ausência de controle adequado da temperatura pode causar falhas, reduzir a vida útil dos componentes e gerar prejuízos significativos. Além disso, um projeto eficiente contribui para a sustentabilidade, reduzindo o consumo energético e os impactos ambientais. Dessa forma, a climatização não é apenas uma questão de conforto térmico, mas um requisito indispensável para a segurança e a eficiência dos processos (Santos et al., 2025).

A refrigeração é um componente essencial para a operação de data centers, pois garante a estabilidade térmica necessária para evitar falhas nos equipamentos e assegurar a continuidade dos serviços. Esses ambientes abrigam servidores de alta densidade (equipamentos de TI) que geram grandes quantidades de calor, tornando indispensável um sistema de resfriamento eficiente para manter a temperatura dentro das faixas recomendadas. Além de proteger a infraestrutura crítica, a climatização contribui para o conforto térmico dos profissionais que atuam nesses espaços, criando condições adequadas para o trabalho. Sem um controle térmico eficaz, há riscos de interrupções, perda de desempenho e aumento significativo dos custos operacionais, reforçando a importância estratégica da refrigeração para a confiabilidade e a eficiência dos processos (Romano, 2023).

Com os avanços na eletrônica, em sistemas digitais e modelos analíticos, observa-se uma expansão no uso dessa abordagem, aplicando-a para aprimorar a manutenção, realizada somente quando estritamente necessário, por intermédio da manutenção preditiva. As metodologias preditivas incluem análise de vibrações, monitoramento de temperatura, identificação de vazamentos, medição de espessuras, detecção de falhas em materiais metálicos e avaliação de lubrificantes (Nepomuceno, 2014).

Para atender aos requisitos legais e promover a eficiência dos sistemas de climatização, é imperativo implementar um Plano de Manutenção e Controle, conforme estabelecido por meio da Lei nº 13.589 (Brasil, 2018). Este plano é fundamental para garantir a qualidade do ar em ambientes climatizados, prolongar a vida útil das instalações e reduzir o consumo de energia associado. O PMOC, segundo a Lei nº 13.589, abrange dois principais segmentos: a manutenção mecânica do sistema de refrigeração e a análise da qualidade do ar interno. No contexto da manutenção mecânica do sistema de refrigeração, o Plano de Manutenção e Controle estabelece diretrizes para as atividades de inspeção, limpeza, regulagem e conservação dos componentes do sistema, como condensadores, evaporadores, compressores e trocadores de calor. Essas atividades visam garantir o bom funcionamento do sistema, prevenir falhas operacionais e prolongar a vida útil dos equipamentos. A execução regular dessas tarefas contribui para a eficiência energética do sistema, reduzindo o consumo de energia e os custos operacionais (Brasil, 2018).

O Plano de Manutenção e Controle, além de atender aos requisitos legais previstos na Lei nº 13.589, estimula a eficiência operacional e energética dos *chillers*. A execução regular das atividades de inspeção, limpeza e conservação dos componentes do sistema favorece o funcionamento eficaz do equipamento, bem como previne falhas operacionais e prolonga a vida útil, portanto, resulta em uma central de água gelada mais eficiente e segura. O estudo de caso na Empresa X, por sua vez, ressalta que a manutenção em *chillers*, aliada à análise da qualidade do ar interno por meio de processos consistentes – tais como os parâmetros estabelecidos no Plano de Manutenção, Operação e Controle, previsto pela Lei nº 13.589, oferece vantagens significativas – atendimento às exigências legais, redução do consumo de energia, mitigação dos custos operacionais, prolongação da vida útil dos equipamentos, entre outros benefícios relevantes oriundos da manutenção preditiva em *chillers* (Brasil, 2018).

1.2 HIPÓTESE

A adoção de estratégias de manutenção preditiva e corretiva em sistemas de *chillers* industriais contribui para o aumento da confiabilidade operacional do sistema de refrigeração, redução do tempo de inatividade não planejado e melhoria da eficiência energética, evidenciada por indicadores como menor consumo de energia, maior capacidade de refrigeração e redução de falhas após a intervenção, impactando positivamente a produtividade organizacional.

1.3 JUSTIFICATIVA

A presente pesquisa se justifica ao ponderar que o estudo de caso real da capacidade da central de água gelada na Empresa do segmento financeiro revela a importância da manutenção em *chillers* para otimizar a eficiência operacional e melhorar a capacidade energética. A aplicação de estratégias associadas à manutenção emerge como uma vantagem competitiva relevante, pois maximiza a vida útil dos equipamentos e minimiza custos operacionais. A monitorização contínua do estado dos *chillers* possibilita a identificação precoce de falhas potenciais, e permite intervenções programadas que evitam paralisações não planejadas e garantem a disponibilidade operacional dos sistemas de refrigeração.

Ao evitar perdas significativas de produção associadas a interrupções repentinas, a manutenção preditiva dos *chillers* fortalece a competitividade da Empresa ao maximizar sua eficiência operacional. Ademais, essa prática alinha-se com as tendências da indústria 4.0, e evidencia o comprometimento da Empresa com a excelência operacional, a sustentabilidade e a adoção de tecnologias avançadas para otimizar seus processos industriais. A manutenção preditiva, ao permitir a monitoração contínua e a previsão de falhas antes que ocorram, melhora significativamente a eficiência operacional das indústrias. Seus principais benefícios incluem a redução de custos operacionais, o aumento da eficiência produtiva, a melhoria da segurança e a otimização do inventário de peças de reposição.” (COSTA et al., 2024).

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GERAL

O propósito deste estudo é examinar o problema de pesquisa identificado a seguir: Quais são os efeitos da implementação de estratégias de manutenção na capacidade operacional dos *chillers*, e qual é o potencial de redução de custos operacionais proporcionado pela adoção de manutenção em *chillers*? Averiguar as vantagens proporcionadas pela manutenção na mitigação de custos operacionais e na maximização da eficiência energética de sistemas de *chillers*.

1.4.2 Objetivo Específico

Nesta pesquisa, foram concebidos três objetivos específicos para o estudo de caso real na empresa, a fim de entender todo os possíveis problemas das centrais de água gelada e os resultados obtidos associados à manutenção. Os quais são apresentados da seguinte forma:

- a) Avaliar a capacidade de resfriamento da Central de Água Gelada da empresa X, verificando sua conformidade com os parâmetros de projeto e demanda operacional;
- b) Identificar os fatores limitantes da capacidade operacional associados à Central de Água Gelada, considerando aspectos técnicos, ambientais e de manutenção que impactam o desempenho dos *chillers*;
- c) Comparar as condições operacionais antes e após a manutenção dos *chillers*, analisando as evidências de resultados obtidos, incluindo ganhos energéticos, melhoria da eficiência e redução de falhas

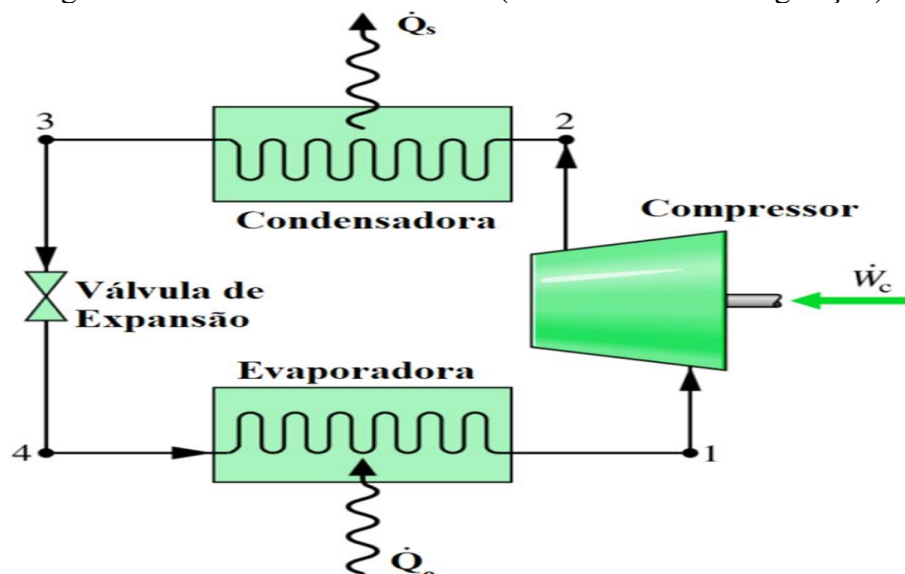
1.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.5.1 O QUE É O *CHILLER* E AS ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO

O *chiller* é um equipamento de refrigeração utilizado para remover calor de um líquido, geralmente água ou soluções refrigerantes, transferindo-o para o ambiente externo. Esse líquido resfriado é então distribuído para sistemas de climatização ou processos industriais que exigem controle térmico rigoroso, como data centers, hospitais e grandes instalações comerciais. O funcionamento do *chiller* baseia-se no ciclo de compressão de vapor, envolvendo etapas de compressão, condensação, expansão e evaporação, garantindo um resfriamento eficiente e contínuo. Por sua capacidade de manter temperaturas estáveis em ambientes críticos, o *chiller* é considerado um componente essencial para a confiabilidade operacional e para a eficiência energética em projetos de grande porte (MDBF, 2025).

Um *chiller* consiste em uma unidade evaporadora, uma unidade condensadora, uma válvula de expansão, um compressor e um sistema de controle elétrico. Com exceção do sistema de controle elétrico, esses componentes formam os elementos fundamentais de um ciclo de refrigeração (Cengel e Ghaiar, 2012). A Figura 1 apresenta, fundamentada no Ciclo de Carnot, os quatro processos a seguir: a) Compressão adiabática, representada na imagem pelo processo 1-2; b) Rejeição isotérmica de calor, representada na imagem pelo processo 2-3; c) Expansão adiabática, representada na imagem pelo processo 3-4; d) Absorção isotérmica de calor, representado na imagem pelo processo 4-1.

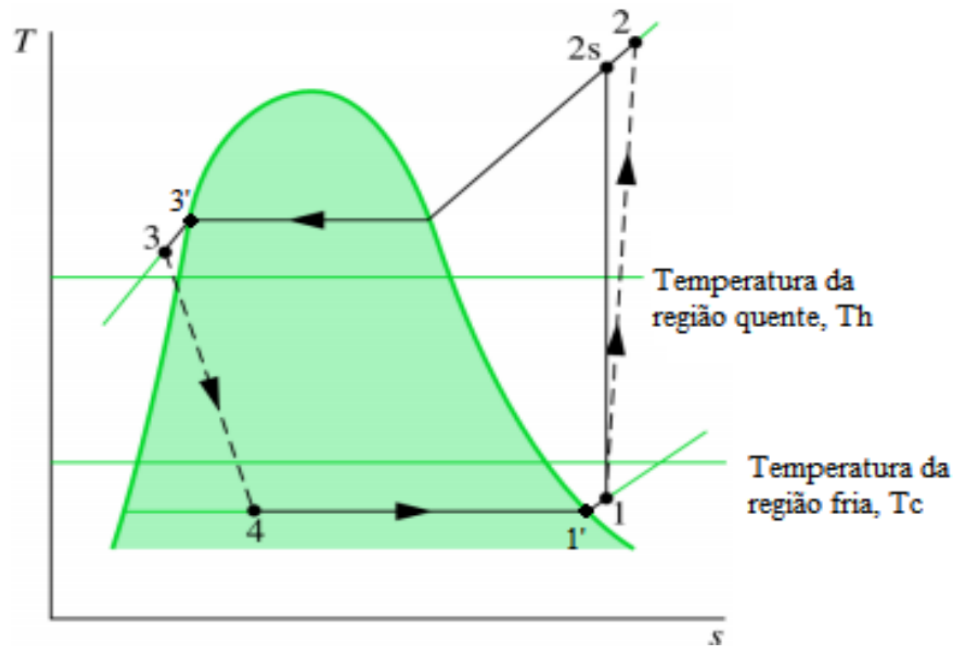
Figura 1 - Processo de resfriamento (Ciclo Básico de refrigeração).



Fonte: Cengel e Ghaiar (2012).

O *chiller* funciona conforme o ciclo de refrigeração, apresentando graus de subresfriamento e superaquecimento. Na eficiência de sistemas de refrigeração, essas alterações de temperatura são cruciais para assegurar o funcionamento adequado dos componentes. É possível verificar ambos os fenômenos na Figura 2, onde entre os pontos 3 e 3' ocorre o subresfriamento e entre os pontos 1 e 1' ocorre o superaquecimento.

Figura 2 - Processo de resfriamento por compressão.



Fonte: Cengel e Ghaiar (2012).

Nos *chillers* que utilizam resfriamento à água, o estágio 2-3 – Figura 1 –, que envolve a rejeição de calor, realiza-se na condensadora por meio da interação entre o fluido refrigerante primário e a água de condensação. No estágio 4-1, ocorre a transferência de calor entre o fluido secundário e o primário. Esse processo é denominado de expansão indireta, ao considerar que o fluido secundário transfere calor aos *fan coils* responsáveis pela distribuição de ar e pelo resfriamento dos espaços. A Figura 3 apresenta, de forma ilustrativa, um modelo de *chiller* centrífugo magnético resfriado à água sem óleo e com recuperação de calor¹ (H. Stars Group, 2024).

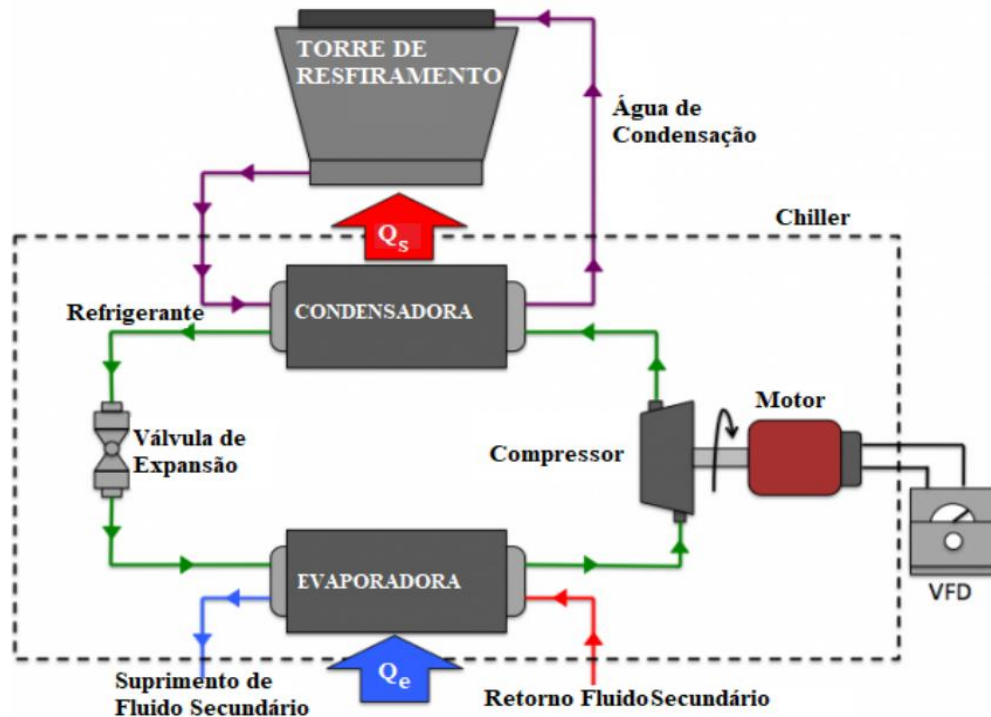
Figura 3 - *Chiller* centrífugo magnético resfriado à água.



Fonte: H. Stars Group (2024).

Nesse caso, é imprescindível que o *chiller* esteja equipado com uma torre de resfriamento, a fim de dissipar o calor da água de condensação, e com *fan coils*, para efetuar a distribuição de calor no local. A Figura 4 apresenta um diagrama de *chiller* refrigerado à água.

Figura 4 - Diagrama de *chiller* refrigerado à água.



Fonte: Baglione (2022), adaptado pelo autor.

Os *chillers* são componentes críticos em sistemas de climatização para edifícios comerciais e industriais, responsáveis por fornecer água gelada para processos de resfriamento. Sua operação eficiente impacta diretamente o consumo energético e a confiabilidade do sistema HVAC. Estudos recentes destacam que a escolha adequada do *chiller* e sua manutenção são fatores determinantes para reduzir custos operacionais e prolongar a vida útil do equipamento, além de contribuir para a qualidade do ar interno e conforto térmico dos usuários (SILVA et al., 2023).

A manutenção preventiva tem papel essencial na otimização do desempenho dos *chillers*. Pesquisas indicam que práticas como inspeções regulares, limpeza de serpentinas e calibração de sensores reduzem o consumo energético e evitam falhas inesperadas. Um estudo publicado em 2025 mostrou que a aplicação sistemática dessas práticas pode aumentar a eficiência energética em até 15%, além de reduzir custos com reparos emergenciais e prolongar a vida útil do equipamento (ALMEIDA; SOUZA, 2025).

A ausência de manutenção adequada em *chillers* pode levar a problemas graves, como incrustações em trocadores de calor, vazamentos de refrigerante e falhas mecânicas em compressores. Esses problemas não apenas reduzem a capacidade de resfriamento, mas também aumentam significativamente o consumo de energia e os custos operacionais. Além disso, a falta de calibração nos sistemas de controle pode comprometer a estabilidade térmica e reduzir a confiabilidade do sistema HVAC, encurtando a vida útil do equipamento (FERREIRA et al., 2024).

A manutenção preditiva tem se consolidado como uma abordagem inovadora para aumentar a confiabilidade dos *chillers*. Baseada em monitoramento contínuo e análise de dados, essa estratégia permite prever falhas com antecedência, evitando paradas não planejadas. Estudos recentes apontam que a manutenção preditiva pode reduzir em até 73% as paradas emergenciais e gerar economia de 15% a 25% nos custos operacionais, tornando-se uma solução estratégica para instalações críticas, como data centers e indústrias farmacêuticas (MARTINS; LIMA, 2024).

Os custos de manutenção de *chillers* variam conforme o tipo de equipamento, condições operacionais e práticas adotadas. *Chillers* resfriados a água, por exemplo, exigem sistemas de tratamento para evitar corrosão e incrustações, enquanto os resfriados a ar demandam limpeza frequente das serpentinas. A adoção de manutenção preventiva e preditiva, embora represente um investimento inicial maior, reduz significativamente os custos de operação e prolonga a vida útil do equipamento, resultando em melhor retorno sobre o investimento ao longo do ciclo de vida (COSTA; BARROS, 2023).

O plano de manutenção visa organizar o processo de inspeção e manutenção de elementos essenciais para a operação eficiente de qualquer maquinário. Nos planos de manutenção, são realizadas atividades como a limpeza, inspeção visual, medição de temperaturas, pressões e outros parâmetros críticos para a detecção de anomalias, verificação de possíveis vazamentos, reaperto de conexões, substituição ou limpeza de peças que sofrem maior desgaste, como filtros e rolamentos, e aplicação de tratamentos químicos, entre outras. Adicionalmente, durante as inspeções visuais, pode ser necessária a substituição de componentes que não estavam previstos inicialmente (ABNT, 2018).

Ao avaliar o plano de manutenção em estruturas de grande porte, como por exemplo, o plano de manutenção do Data Center da empresa X, constata-se que a manutenção é predominantemente preventiva e sistemática, dividida em intervalos fixos que podem ser mensais, semestrais ou anuais, com intervenções ad hoc em casos de falhas. Além disso, há instalações que implementam manutenção preditiva com monitoramento periódico. Tais instalações realizam coletas esporádicas de dados, como pressão e temperatura. Com base nessas coletas programadas, avalia-se a necessidade de manutenção ou substituição de componentes, representando uma evolução da manutenção preventiva sistemática, que sempre executa manutenções ou substituições, independentemente do estado vigente do componente (ABNT, 2018).

Desde a climatização orientada ao conforto humano até o gerenciamento térmico em data centers, a aplicação de *chillers* é habitual em instalações de refrigeração. Tais sistemas são tipicamente complexos, incluindo o *chiller*, foco deste capítulo, além de torres de resfriamento, bombas, ventiladores, painéis elétricos, entre outros. Cada um desses subsistemas possui múltiplos componentes como acoplamentos, filtros, juntas, válvulas, entre outros. Um sistema integral de ar-condicionado engloba vários subsistemas que requerem atenção e um plano de manutenção robusto para assegurar seu funcionamento adequado, já que a falha em um subsistema pode comprometer a eficácia do sistema de climatização (ABNT, 2018).

As orientações para periodicidade de manutenção são definidas como semanal, mensal e anual, com atividades específicas para cada intervalo. Recomenda-se o registro semanal dos dados de operação. Adicionalmente, se existir um sistema de monitoramento ou análise intensiva de determinados componentes, como a coleta de amostras de óleo para análise laboratorial, o intervalo entre manutenções pode ser estendido com base nas especificações dos componentes (ABNT, 2018).

A manutenção do evaporador envolve a unidade responsável pela troca de calor entre dois sistemas fechados, reduzindo assim as possibilidades de incrustações e obstruções.

Sua manutenção inclui a verificação do grau de superaquecimento baseado nos dados operacionais, inspeção visual do isolamento térmico da unidade, detecção de vazamentos e abertura da unidade para limpeza. O condensador, similar à unidade evaporadora, opera em um ciclo aberto, aumentando a importância da manutenção de abertura e limpeza. Outras tarefas de manutenção do condensador incluem a limpeza do sistema de drenagem, a purga de gases não condensáveis do sistema, medição e registro do grau de subresfriamento com base nos dados operacionais e identificação de vazamentos (ABNT, 2018).

Devido à presença de componentes móveis e sistemas elétricos, o compressor requer atenção especial em sua manutenção. É essencial verificar o sistema de óleo, observando sua pressão, temperatura, filtros, linhas e conexões. Além disso, é importante examinar elementos como rolamentos, rotores, carcaça, fixação e apertos. Finalmente, é necessário inspecionar o sistema elétrico como um todo, incluindo seu isolamento. O circuito refrigerante, que abrange partes na unidade condensadora, evaporadora e no compressor, exige inspeção da tubulação, isolamento térmico, válvulas solenoide e de expansão, correção de vazamentos de fluidos, verificação de umidade no visor de líquido e inspeção do filtro de secador. Quanto aos painéis elétricos e eletrônicos, é vital inspecionar a integridade de componentes como fios, fusíveis, lâmpadas de sinalização, botoeiras, e assim por diante.

Segundo Silva (2020), a manutenção de *chillers* com condensação a água é uma prática indispensável para garantir o desempenho térmico e a confiabilidade dos sistemas de climatização. Como esses equipamentos utilizam água como meio de troca de calor, é essencial controlar a qualidade da água, evitando incrustações, corrosão e acúmulo de resíduos que possam comprometer a eficiência do sistema. A limpeza periódica dos trocadores de calor e a inspeção dos circuitos hidráulicos são medidas básicas que ajudam a manter o funcionamento adequado.

Conforme Costa (2019), investir em tecnologias preditivas e capacitação técnica é fundamental para aumentar a vida útil dos *chillers* e reduzir custos operacionais. Ferramentas como termografia, análise de óleo e monitoramento remoto contribuem para antecipar falhas e otimizar intervenções. Além disso, manter registros detalhados das manutenções realizadas e seguir uma rotina estruturada de inspeções são práticas que promovem maior segurança, eficiência energética e sustentabilidade nos sistemas de refrigeração.

Segundo Moura (2021), a eficiência operacional dos *chillers* está diretamente ligada à periodicidade e à qualidade das manutenções realizadas. A negligência em pequenos ajustes, como o balanceamento do fluxo de água ou a verificação da pressão de operação, pode resultar em sobrecarga dos compressores e aumento significativo no consumo de energia. Por isso, é

recomendável que os planos de manutenção sejam personalizados conforme o perfil de uso da instalação, considerando fatores como carga térmica, ambiente externo e regime de operação.

De acordo com Ferreira (2022), a manutenção corretiva deve ser encarada como última alternativa, já que geralmente envolve custos elevados e riscos de interrupção dos serviços. A abordagem ideal é a manutenção preditiva, que utiliza dados históricos e sensores inteligentes para prever falhas antes que elas ocorram. Essa estratégia permite maior controle sobre o ciclo de vida dos componentes e reduz o tempo de inatividade dos sistemas, promovendo uma operação mais segura e econômica.

Segundo Lima (2020), a eficiência energética dos *chillers* com condensação a água está diretamente relacionada à correta operação dos sistemas auxiliares, como torres de resfriamento e bombas de circulação. Quando esses componentes operam em sincronia e dentro dos parâmetros ideais, o *chiller* consome menos energia para atingir a mesma capacidade de resfriamento. Ajustes finos na vazão de água, na temperatura de entrada e na frequência dos motores podem gerar economias significativas ao longo do tempo.

1.5.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E SUSTENTABILIDADE: OPORTUNIDADES E DESAFIOS ASSOCIADOS AO PROCESSO EVOLUTIVO TECNOLÓGICO

Existem *Datacenters* em vários ambientes organizacionais – pequeno, médio e grande porte –, cujos instrumentos tecnológicos representam uma categoria essencial para a conjuntura econômica global contemporânea. Para a instalação dos *Datacenters*, há algumas configurações associadas à estrutura física, cuja configuração pode envolver um pequeno ambiente – uma sala específica para o *Datacenter*, nos casos em que a organização é de pequeno ou médio porte, por exemplo –, assim como existem configurações físicas que exigem um ambiente amplo, como por exemplo, *Datacenters* instalados em organizações de grande porte (NRDC, 2014).

Em países com um melhor desenvolvimento econômico, nota-se um aumento contínuo e preocupante referente ao alto nível de consumo de energia elétrica associado aos *Datacenters*, cuja demanda tem sido cada vez mais maior devido ao processo evolutivo da tecnologia na vida das pessoas no âmbito social, além do ambiente econômico responsável pela alta competitividade mercadológica em vários setores. Há algumas organizações que já tomaram providências para alcançar uma utilização energética mais sustentável responsável, como por exemplo, o Google e o Facebook. A estrutura destas organizações utiliza métodos

para refrigeração com eficiência, e além disso, há uma avaliação contínua referente às soluções computacionais a fim de atingir um alto índice de performance.

O alto índice associado ao uso de *Datacenters* envolve fatores complexos, como por exemplo, o nível de performance de um *Datacenter* é reduzido de forma extrema quando ocorre a diminuição do seu uso. Apesar do uso do *Datacenter* demonstrar um obstáculo complexo, é possível também aplicar outra perspectiva, isto é, este desafio também pode ser encarado como uma oportunidade relevante aos administradores responsáveis por estas estruturas tecnológicas, como por exemplo, aplicar medidas táticas com a finalidade de reduzir o nível de consumo energético.

1.5.3 Tecnologia, sociedade e economia

Ao longo da história, as sociedades foram modificadas por meio de incontáveis mudanças providas de novas formas de organização e comunicação. A partir da segunda metade do século XX e, especialmente, durante o século XXI, a evolução tecnológica tem influenciado tais transformações de forma expressiva, na medida em que os indivíduos se permitem influenciar por relações sociais inéditas, oriundas da utilização de instrumentos tecnológicos (Mallinson, 2013).

Para a compreensão deste cenário, se faz necessário ultrapassar as mudanças da própria sociedade, sua forma de agir, pensar e se relacionar, mas também compreender a função, a evolução, e os impactos das TICs – Tecnologias da Informação e da Comunicação em tal processo. É importante salientar que as TICs estão entre os principais agentes de mudança social e econômica nas últimas décadas (Santaella, 2016).

A essencialidade dessas tecnologias tem se mostrado óbvia não apenas em hábitos corriqueiros do cotidiano das pessoas, mas também em todo o espectro econômico, social e político, tornando-se objeto de crescente atenção e variável estratégica na competitividade das nações. É importante destacar como os mais recentes avanços tecnológicos obtidos em matéria de produção, armazenagem, processamento, transporte e distribuição de informações perfizeram verdadeiras revoluções nas formas tradicionais de comunicação, interação social, acesso a conteúdo, realização de negócios e, mais recentemente, na organização produtiva. (Casotti, 2018, p. 3).

Os mecanismos tecnológicos são responsáveis pela promoção de diversas formas originais de convivência em sociedade, e com mudanças profundas nas interações sociais, em que surgem novos modelos de trabalho, assistência à saúde, sistemas de aprendizagem,

métodos de trabalho, entre outros recursos desenvolvidos com o apoio de recursos tecnológicos (Martinho, 2014). A contar do século passado, a informação tem se tornado universal e o conhecimento é cada vez mais valorizado, tornando-se um valor social, isto é, o principal elemento que movimenta a economia, a política, a cultura e o conhecimento (Monteiro; Rodrigues; Mendes; Silva, 2018).

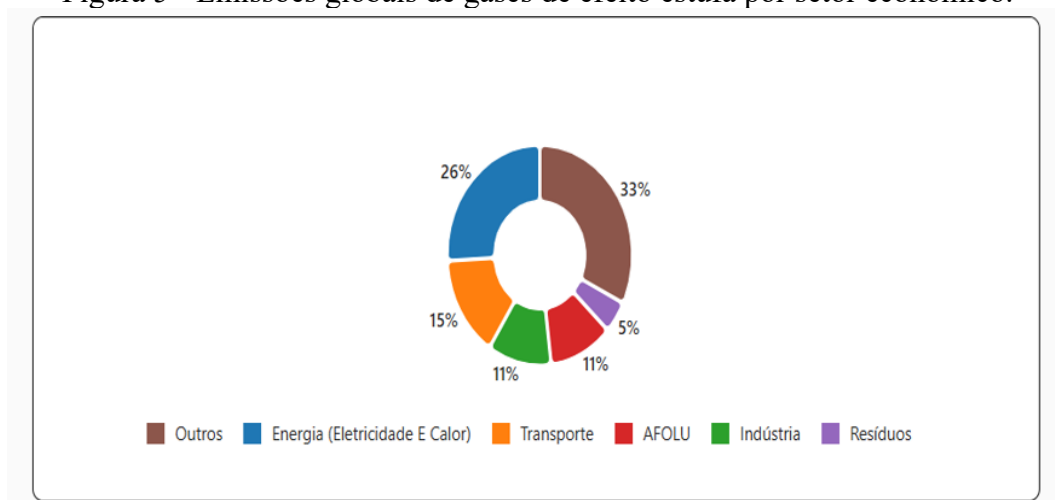
Mediante o uso de dispositivos móveis, a continuidade do tempo alia-se à continuidade do espaço, de forma que a informação fique acessível de qualquer local. Nessa direção, aponta ao progresso dos dispositivos móveis, demonstrada pelos celulares multitarefas de última geração, como por exemplo transformar em totalmente universal e ubíquo o acesso à informação, à comunicação e à consecução de conhecimento (Oliveira, 2017).

1.5.4 Consumo de energia elétrica: visão geral

O setor de energia é responsável por 34,6% de toda emissão de gás carbônico gerado no planeta – ocupando, desta maneira, a principal posição como contribuinte negativo para o avanço do efeito estufa –, é fundamental que a sociedade, juntamente com o apoio de cientistas e gestores organizacionais – Poder Público e Poder Privado – unam forças para buscar soluções sustentáveis, a fim de reduzir os danos causados pela crescente utilização de recursos tecnológicos que, por sua vez, estão entre os responsáveis pelo aumento do consumo de energia em nível global. Portanto, devido à dependência associada à energia elétrica, o progresso contínuo dos recursos tecnológicos deve ser discutido e gerenciado de forma cautelosa, sabendo-se que a energia utilizada pelos instrumentos tecnológicos é o principal causador de danos ao meio ambiente em escala mundial (Reis; Santos, 2014).

De acordo com o relatório publicado pelo IPCC (2023), as emissões de gases de efeito estufa em nível global pode ser definidos por meio das atividades exercidas no ambiente mercadológico, a fim de avaliar o nível produtivo responsável pela emissão destes gases danosos para o meio ambiente. A Figura 5 ilustra, estatisticamente, o percentual desta responsabilidade de acordo com os principais ramos de atividade econômico em nível internacional.

Figura 5 - Emissões globais de gases de efeito estufa por setor econômico.



Fonte: IPCC (2023).

De acordo com Mattos (2021), o alto nível de consumo da Internet tem contribuído de forma expressiva para o aumento de emissão de gás carbônico. O autor ressalta algumas questões associadas ao consumo de recursos tecnológicos conectados à Internet que, consequentemente, tornam-se responsáveis por elevar o nível de consumo de energia elétrica em todo o planeta:

Se a Internet fosse comparada a um país, seria o 6º maior emissor de CO₂;
 A Internet em breve será responsável pelo consumo de 10% do uso global de eletricidade;
 Data centers consomem aproximadamente 2% da eletricidade do mundo;
 O setor de tecnologia contribui entre 3% a 3,6% com as emissões globais de CO₂;
 Deixar uma aba do browser aberta por muito tempo consome mais energia e recursos que a produção de um jornal;
 A Netflix sozinha representa 15% do uso de internet mundial;
 Otimizações no YouTube economizariam a mesma emissão de CO₂ da produção anual de 50.000 carros. (Mattos, 2021).

O alto nível de consumo da Internet é um reflexo da globalização, e para propor a concepção de globalização e suas consequências na conjuntura internacional, é fundamental desenvolver uma visão mais ampla, pois é necessário analisar a globalização sob várias perspectivas. Apesar do importante papel associado ao avanço das organizações em nível global, e o consequente crescimento do mercado financeiro em virtude deste processo mercadológico internacional, é importante que a avaliação quanto ao processo de globalização não fique restrito, exclusivamente, em critérios econômicos. A globalização depende da combinação de atributos presentes na política, na sociedade, na cultura e no âmbito da economia. Isso se deve, principalmente, ao progresso tecnológico, responsável por aumentar a agilidade e a escala de relação entre os indivíduos na maior parte geográfica do planeta (Christensen; Kowalczyk, 2017).

As consequências geradas pela globalização na sociedade são capazes de alterar muitos hábitos e comportamentos particulares nas pessoas, e as organizações desempenham um papel fundamental neste processo devido à construção de suas marcas no mercado. As transformações oriundas do processo evolutivo nas áreas de tecnologia, informação e comunicação refletem, de forma direta, na gestão estratégica das organizações. Desta maneira, os gestores organizacionais têm o desafio de adaptar as estratégias de mercado de acordo com as inovações geradas por este processo evolutivo, a fim de alcançar maior eficácia mercadológica (Wild, 2019).

Diante da aceleração competitiva no ambiente mercadológico, e do alto nível de consumo energético em reflexo do contexto econômico contemporâneo, aumenta-se a preocupação sobre o consumo de energia e seus impactos negativos para o meio ambiente. Nesse sentido, os procedimentos e estratégias adotados sobre a maneira

[...] como um software é projetado, desenvolvido e implantado pode ter um grande impacto no consumo de energia. Assim, as empresas devem incluir software em seus esforços de sustentabilidade. Eles devem articular uma estratégia que guie as compensações e permita flexibilidade, revise e refine o ciclo de vida de desenvolvimento de software (Podder; Burden; Singh; Maruca, 2020).

Para que haja uma clareza maior referente a preocupação sobre o nível de consumo de energia associado às novas tecnologias, Podder *et al.* (2020) citara um contexto relevante relacionado o mercado de criptomoedas, e também projetara uma estimativa sobre a emissão de gás carbônico oriunda da utilização das TICs.

Por exemplo, o *blockchain* impulsiona algumas das soluções verdes mais avançadas disponíveis, como microrredes que permitem que os moradores negociem energia ecologicamente correta. E essa inovação de software também está por trás do desenvolvimento da criptomoeda. Em 2019, pesquisadores da Universidade de Cambridge estimaram que a energia necessária para manter a rede Bitcoin ultrapassou a de toda a nação da Suíça. Depois, há o setor de tecnologia da informação e comunicação como um todo. Até 2040, espera-se que seja responsável por 14% da emissão de gás carbônico em todo o mundo – acima dos cerca de 1,5% em 2007 (Podder *et al.*, 2020).

Surgida na Alemanha, a Revolução Industrial 4.0 se deu no ano de 2011, focada ao seguimento de recursos tecnológicos especiais para a manufatura, consistindo na associação do espaço físico ao virtual, impactando nas searas econômica, social e política. Tal era permite uma significativa vantagem na competição, já que por meio de novidades tecnológicas, a falha

humana e os gastos desnecessários passam a ser reduzidos, a competência em usar a totalidade dos insumos, reduzindo as despesas é elevada (Schwab, 2017).

A contínua progressão industrial ainda traz as organizações à Revolução Industrial 4.0, que possibilita conectar equipamentos, pessoas e demandas, pelo uso da Internet. Nesse ínterim, os instrumentos são conectados entre si e à interface humana, permitindo obter informações em *real time* por sensores, e as pessoas poderão usar tais informações a todo momento. A novidade da Revolução Industrial 4.0 se dá no setor da tecnologia, proporcionando a contínua criação de procedimentos, dinâmicas, e relações tecnológicas. Uma fração destas novidades tecnológicas constitui o fundamento da Revolução Industrial 4.0, embora ainda sejam usadas isoladamente na indústria (Gilchrist, 2016).

A Revolução Industrial 4.0 tem transformado a produtividade pela integração das tecnologias existentes, pela automação e otimização da produção, ganhando em efetividade e modificando os convencionais relacionamentos entre os que fornecem, os que produzem e os que consomem. Determinadas novidades tecnológicas dessa nova era incluem a robótica, a Internet das coisas, os *big data*, a segurança dos dados, as nuvens, as modelagens, os sistemas de integração, a produção aditiva e a realidade aumentada (Kumar; Zindani; Davim, 2019).

A sustentabilidade é um constante desafio no cotidiano mercadológico para os gestores organizacionais, especialmente, por exigir do mercado soluções tecnológicas cada vez mais avançadas e inovadoras. Neste sentido, nota-se que a integração entre soluções inovadoras digitais e soluções sustentáveis é fundamental. Isto ocorre pelo fato de que, em muitos casos, nota-se uma situação conflituosa sobre os interesses associados aos benefícios no campo da sustentabilidade e os benefícios presentes no campo da economia. É necessário que haja integração entre as áreas de sustentabilidade e economia, o que significa a convivência entre alvos impactantes e alvos conectados ao mundo dos negócios (Arena *et al.*, 2018).

1.6 METODOLOGIA

Inicialmente, realizou-se uma revisão sistemática da literatura sobre práticas de manutenção em sistemas de *chillers*, com enfoque nos conceitos de eficiência energética e nas normas técnicas aplicáveis ao setor. Essa etapa permitiu estabelecer a base teórica necessária para compreender os procedimentos de manutenção, os parâmetros de desempenho e as correlações utilizadas na avaliação da eficiência operacional.

Na sequência, conduziu-se um estudo de caso em uma instalação real do segmento financeiro, que opera uma Central de Água Gelada destinada ao condicionamento térmico de ambientes críticos. Os dados de teste e operação utilizados, foram extraídos diretamente dos sistemas de monitoramento da planta, garantindo representatividade e confiabilidade das informações. Essa coleta incluiu variáveis operacionais dos *chillers*, torres de resfriamento e demais componentes do sistema.

Com base nos dados registrados, foram calculados indicadores técnicos relevantes, como a relação kW/TR e o consumo hídrico específico, visando avaliar a eficiência energética e operacional do conjunto. Para isso, foram comparados cenários anteriores e posteriores às intervenções de manutenção preditiva realizadas na instalação, permitindo mensurar os impactos das estratégias aplicadas.

Todas as informações obtidas em campo e por meio do software de monitoramento foram utilizadas para a elaboração do diagnóstico operacional e análise dos equipamentos existentes, bem como de sua forma de operação. A partir desses dados, realizaram-se cálculos para validar o desempenho individual e conjunto dos componentes, subsidiando a definição das tratativas necessárias para otimizar o funcionamento do sistema.

Os cálculos de carga térmica foram fundamentados na equação clássica de transferência de calor sensível, expressa por:

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad \text{Equação (1)}$$

onde:

- Q representa a carga térmica (kcal ou kW),
- m é a vazão mássica do fluido (kg/s),
- c corresponde ao calor específico do fluido (kcal/kg·°C ou kJ/kg·K),
- ΔT indica a variação de temperatura entre entrada e saída (°C).

Essa equação é amplamente utilizada em engenharia térmica para o dimensionamento e análise de desempenho de chillers e torres de resfriamento, conforme estabelecido em referências técnicas consolidadas (Engineering ToolBox, 2025; TopBlogTenz, 2025).

Para a avaliação da eficiência energética, utilizou-se a relação entre a potência elétrica consumida (kW) e a capacidade de refrigeração fornecida Tonelada de Refrigeração (TR), métrica consolidada para análise de desempenho em sistemas de climatização.

Por fim, a análise da economia hídrica considerou a correlação entre a carga térmica atendida (em TR) e o volume de água consumido (em m³), permitindo estimar a redução proporcional no consumo hídrico decorrente da implementação das estratégias propostas.

Embora os dados coletados provenham de uma instalação totalmente instrumentada, garantindo ampla disponibilidade de medições operacionais, não foi realizada análise de incerteza ou erro experimental associado às variáveis monitoradas, como temperatura, vazão e potência elétrica. Os registros utilizados não incluem informações sobre a margem de erro ou a precisão dos instrumentos de medição, o que restringe a avaliação da confiabilidade dos resultados obtidos. A ausência desses parâmetros impossibilita a quantificação das variações potenciais nos dados e, consequentemente, a estimativa do impacto dessas variações nos indicadores de desempenho calculados. Essa limitação deve ser considerada na interpretação dos resultados, especialmente em análises comparativas e na proposição de melhorias operacionais, uma vez que pequenas imprecisões podem influenciar significativamente os valores de eficiência energética e consumo hídrico.

2 ESTUDO DE CASO NA EMPRESA DO SEGMENTO FINANCEIRO

Na presente seção, será apresentado um estudo de caso sobre as soluções propostas pela Empresa X, com o propósito de atender necessidades e demandas diante da ampliação do complexo central tecnológico da Empresa, com uma complexa infraestrutura e eletromecânica. O foco deste estudo recai sobre a manutenção em *chillers*, especialmente, a fim de incrementar a eficiência operacional e aprimorar a capacidade energética do referido *Data Center*. Ao considerar a relevância crítica desses ambientes, em que a continuidade operacional é essencial, a Empresa X adota uma abordagem que combina engenharia, com o propósito de desenvolver soluções sustentáveis capazes de atender demandas técnicas, preocupações ambientais e questões de segurança. A natureza ininterrupta das operações de *Data Centers* requer que os sistemas funcionem com desempenho máximo, sobretudo, por meio de alto grau segurança operacional e eficiência energética elevada.

A manutenção em *chillers* emerge como uma estratégia essencial para otimizar a performance dos sistemas de resfriamento do *Data Center*. Ao priorizar a manutenção desses dispositivos, a Empresa X demonstra sua compreensão em garantir a integridade e a confiabilidade dos sistemas de resfriamento, essenciais para a operação ininterrupta do *Data Center*. Ademais, ao buscar melhorias na eficiência energética dos *chillers*, a Empresa X contribui para reduzir o consumo de energia, alinhando-se às tendências contemporâneas de sustentabilidade e eficiência energética.

2.1 APRESENTAÇÃO INICIAL DO CASO

O estudo de caso trata-se de um *Data Center* na empresa do segmento financeiro, apresentado na Figura 6, representa um empreendimento de extrema importância e complexidade no contexto nacional, destacando-se pela sua ampla infraestrutura eletromecânica.

A complexidade do *Data Center* da empresa X reside na sua escala impressionante, e também na intrincada infraestrutura eletromecânica necessária para garantir o funcionamento seguro e eficiente do *Data Center*. Com um total de 5.522,95 m² de área de piso elevado onde estão localizados os equipamentos de TI, a estrutura proporciona o ambiente ideal para abrigar os equipamentos de processamento de dados. Essa área elevada é essencial para a gestão eficaz do cabeamento, refrigeração e distribuição elétrica, elementos essenciais para a performance confiável das operações de TI em larga escala. Esse empreendimento exemplifica a capacidade

de coordenação e execução eficiente de projetos de infraestrutura de grande porte, e demonstra o compromisso da empresa X em manter-se na vanguarda da tecnologia e da segurança da informação. Sobretudo, evidencia a relevância estratégica dos *Data Centers* na infraestrutura das instituições financeiras, e ressalta a necessidade contínua de investimento e inovação nesse campo (GCE, 2024).

Figura 6 - Data Center da empresa X – Ambiente interno – Chiller centrífugo.



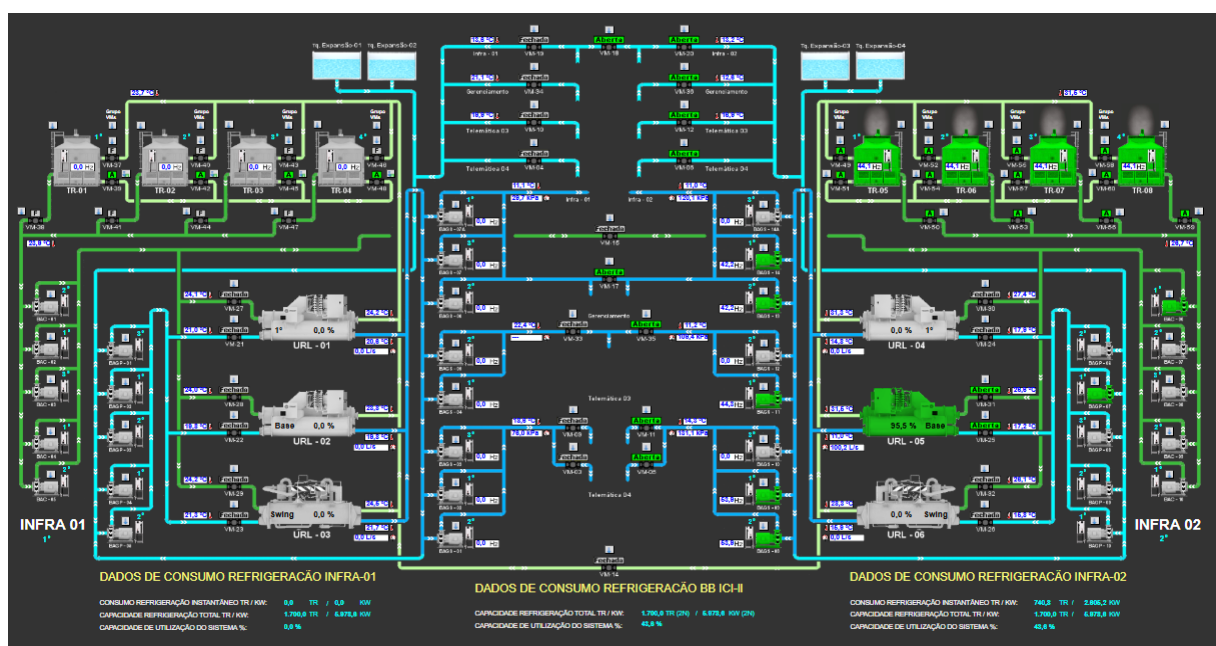
Fonte: GCE (2024).

O sistema de resfriamento do data center da empresa X é baseado no sistema de expansão indireta, ou seja, um arranjo de climatização no qual o fluido refrigerante não entra em contato direto com o ar do ambiente. Em vez disso, ele resfria um fluido intermediário (geralmente água ou solução glicolada), que circula até os pontos de consumo para realizar a troca térmica. A central de água funciona com 3 circuitos, circuito de bombas primário, secundário e de condensação. Existem duas centrais de água gelada localizadas em blocos distintos, denominadas infra 1 e infra 2, redundantes entre si, ou seja, possuem redundância do tipo 2N, sendo o N a soma de equipamento que atende o sistema. Cada central de água gelada possui três *chillers*, dois *chillers* tipo centrífugos com capacidade nominal de 770 TR e possui arrefecimento por água de condensação e um *chiller* tipo parafuso com capacidade nominal de 350 TR e arrefecido por água de condensação. Na laje de cobertura de cada infraestrutura (1 e 2) possuem quatro torres de resfriamento, totalizando 8 torres de resfriamento, sendo que a redundância é N+1 dentro da configuração 2N, ou seja, são três torres em operação e uma reserva por infra. Esses equipamentos atendem todos os *fancoils* do data center, ou seja, áreas de infraestrutura, gerenciamento e principalmente telemáticas (ambientes que estão os

equipamentos de TI). Os três conjuntos de bombas (primária, secundária e de condensação) estão instaladas dentro da sala da CAG em cada uma das infras. As bombas possuem redundância N+1. Visando atender a redundância de equipamentos 2N para cada central de água gelada, a água gelada está dividida em circuito primário, secundário e circuito de água condensada. Para o circuito de bombas primárias (BAGP) existem 3 bombas de água gelada primária para o *chiller* centrífugo e 2 bombas de água gelada primárias (BAGP) para o *chiller* parafuso. Para o circuito de bombas secundárias (BAGs) existem 08 bombas. Para o circuito de bombas de água condensada (BAC), existem 5 bombas, 3 bombas para o *chiller* centrífugo e 2 bombas para o *chiller* parafuso.

O sistema de automação da central de água gelada e seus respectivos periféricos é feita através do software *Tracer* da fabricante *trane*. Este software é responsável por monitorar as centrais de água gelada e por definir o modo de operação. As centrais de água gelada podem operar de forma individual ou simultânea, mas em situações normais operam de forma individual. O software *Tracer* é responsável por monitorar e operar os seguintes itens: controlar a operação do rodízio das centrais de água gelada, monitorar quais equipamentos estão com falhas, monitorar quais equipamentos estão ligados e desligados, controle dos ventiladores das torres de resfriamento, que possuem variadores de frequência, controle do modo de operação da água condensada, configuração manual do sequenciamento dos *chillers*, das bombas, das torres e controle das válvulas motorizadas.

Figura 7 - monitoramento BMS da central d'água CAG1 e CAG2.



Fonte: dados fornecidos pela empresa X.

As duas centrais de água gelada (CAG), são bem instrumentadas, o que é essencial para garantir a operação eficiente, segura e monitorada do sistema. Os principais dispositivos incluem sensores de temperatura instalados nas linhas de água gelada e de condensação, bem como nos evaporadores e condensadores dos *chillers*, permitindo o controle preciso do *setpoint* e da performance térmica. A medição de pressão é realizada por manômetros e transmissores diferenciais, fundamentais para avaliar a integridade hidráulica e detectar perdas de carga em filtros e trocadores. Para assegurar a circulação adequada, são utilizados medidores de vazão — magnéticos, ultrassônicos ou tipo turbina e chaves de fluxo. A instrumentação elétrica contempla medidores de energia, sensores de corrente e tensão, além de relés de proteção para bombas e compressores. Em tanques e bacias, chaves e transmissores de nível controlam a reposição automática. Os sistemas de automação, como controladores CLPs (controlador Lógico Programável) e plataformas BMS (*Business Service Management*)., integram todos os dados, permitindo ajustes em válvulas motorizadas e supervisão centralizada. Essa instrumentação integrada assegura confiabilidade operacional, eficiência energética e prolonga a vida útil dos equipamentos. Na figura 7, mostra a divisão da instalação bem como todos os pontos de monitoramento do sistema.

2.2 SITUAÇÃO-PROBLEMA: AVALIAÇÃO SOBRE A CAPACIDADE DA CENTRAL DE ÁGUA GELADA REFERENTE

Os estudos para verificar a capacidade das centrais da empresa X, ocorreram em janeiro de 2024 e visava determinar, com base nas condições ambientais externas, nas condições que os equipamentos desse sistema se encontram e nos *setpoints* de operação dos equipamentos, a capacidade térmica que a Central de Água Gelada (CAG) consegue fornecer para climatização dos ambientes aos quais atende. A Central de Água Gelada foi projetada em topologia com redundância de equipamentos 2N, e é composta por duas infraestruturas completamente distintas, CAG 1 e CAG 2. Cada uma das infraestruturas possui entre seus equipamentos bombas, *chillers*, tubulações e torres de resfriamento. Atualmente, por possuir carga demandada inferior a carga projetada, a Central de Água Gelada opera em revezamento entre os equipamentos de cada uma das. O sistema funciona com uma central de água gelada por vez, com três *chillers* de condensação a água, sendo dois de compressor centrífugos de 770TR e um de compressor parafuso de 350TR, para atender a uma carga de T_i de até 4 MW de potência de projeto.

Figura 8 - Data Center da empresa X – Ambiente interno – *Chiller* parafuso



Fonte: Fornecido pela empresa x.

O estudo de capacidade da Central de Água Gelada foi então dividido em 3 etapas principais. A primeira etapa consistiu no levantamento visual, de dados operacionais e nas aferições em campo dos parâmetros significativos. A segunda, etapa interativa, consistiu na análise dos dados obtidos na primeira etapa e subsequente avaliação de equipamentos em diversas condições de operação junto aos respectivos fabricantes, com o uso de softwares dos fabricantes e gráficos de performance. A terceira etapa, consistiu nos cálculos para os mais diversos sistemas e equipamentos a fim de se determinar, de fato, a capacidade da Central de Água Gelada e os aspectos principais que estejam limitando a sua eficácia operacional.

Analisar a eficiência de resfriamento do líquido da Central de Água Gelada, foi fundamento para identificar os fatores que limitam sua capacidade operacional para assegurar o nível mais elevado de confiabilidade, disponibilidade e eficiência referente aos equipamentos que servem a esses ambientes. A análise foi embasada nas recomendações da ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) para as condições climáticas críticas dos próximos 50 anos ($n=50$). Todos os testes e aferições em campo, realizados em conjunto entre a Empresa e o time de operações do *site*.

Quando possível de serem aferidos sem intrusão, os parâmetros necessários à análise foram aferidos em campo com instrumentação existente. Quando inviável de realizar as aferições sem intrusão os parâmetros foram adotados a partir das aferições do software de monitoramento BMS (*Business Service Management*). Em alguns casos específicos, os dados foram fornecidos pela empresa de manutenção ou estimados pela Empresa. Assim, as análises foram realizadas com base em dados médios medidos em campo, dados obtidos do BMS, dados fornecidos pela empresa de manutenção e estimativas de deterioração de materiais e

equipamentos realizadas pela Empresa X. Quando o valor for estimado, será declarada tal estimativa, bem como explicada a metodologia para a qual a estimativa foi realizada.

Assim como os dados aferidos em campo, os dados obtidos do *BMS*, foram cruciais para determinação da potência da Central de Água Gelada e estes foram considerados como corretos. No caso de dados muito divergentes, foram aplicadas correções ou desconsiderações nos dados fora do range previsto. Além disso, quando possível, foram adotadas as seleções de fabricantes para seus respectivos equipamentos, sendo esses dados relevantes para a análise da capacidade das Centrais de Água Gelada, e não havendo responsabilidade da Empresa X sobre os dados em questão. Quando os fabricantes não disponibilizaram as seleções dos seus equipamentos, tipicamente por não existirem mais os softwares de seleção.

3 ANÁLISE

Inicialmente, foi realizada a análise da capacidade de resfriamento da Central de Água Gelada (CAG) em operação, com o objetivo de identificar os fatores limitantes que impactam sua performance. Este estudo busca determinar os limites para incremento de carga térmica, garantindo máxima confiabilidade, disponibilidade e eficiência dos equipamentos responsáveis pelo condicionamento dos ambientes atendidos pelo sistema. Os parâmetros de projeto inicial deste estudo, eram para atender a carga de 4MW de T_i , atualmente o sistema está com capacidade perto de 3 MW de T_i , ou seja, falta apenas 1MW para atingir sua capacidade máxima de projeto executivo.

Durante a avaliação, foram aferidas em campo as temperaturas da água na bacia de cada torre de arrefecimento, que é mesma água que vai para as condensadoras, bem como as condições psicrométricas do ar de admissão, incluindo temperatura de bulbo seco e umidade relativa. Adicionalmente, foram registradas as condições climáticas externas, longe da influência das torres, contemplando temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar, no mesmo momento das medições realizadas nas torres.

Os resultados dessas aferições estão apresentados na Tabela 1, que reúne os valores obtidos para as torres de arrefecimento, e na Tabela 2, que apresenta as condições climáticas externas no período das medições.

Tabela 1 - Aferições da temperatura da água na bacia das torres de arrefecimento

Local	Equipamento	Temperatura Água na Bacia $TBU_{\text{água,bacia}}$ [°C]	Temperatura Média Retorno $TBU_{\text{água,méd}}$ [°C]	Temperatura Admissão Ar $TBS_{ar,adm}$ [°C]	Umidade Relativa Admissão Ar $UR_{ar,adm}$ [%]		
Infra 1	TR-01	31,1	31,1	27,9	67,5		
	TR-02	31,1					
	TR-03	31,1					
	TR-04	31,1					
Infra 2	TR-05	31,1	31,1				
	TR-06	31,1					
	TR-07	31,1					
	TR-08	31,1					

Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Tabela 2 - Aferições da temperatura externa do ar

Temperatura Ar Externo $TBS_{\text{ar,ext}} \text{ [}^{\circ}\text{C]}$	Umidade Relativa Ar Externo $UR_{\text{ar,ext}} \text{ [%]}$
24.2	76.8

Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Na etapa seguinte foram realizadas medições em cada um dos *chillers*, contemplando condições de operação em cargas parciais e em cargas máximas temporárias. Para as aferições iniciais, considerou-se, sempre que possível, a operação individual de cada Unidade Resfriadora de Líquido (URL) em sua capacidade máxima, de forma isolada, visando determinar o desempenho nominal dos equipamentos.

Durante os testes, as URLs 03 e 06 foram avaliadas sob condições específicas, operando simultaneamente com uma URL centrífuga, necessária para atender à carga térmica residual do sistema durante os ensaios. Essa configuração permitiu manter a estabilidade operacional e garantir a segurança do processo de aferição, conforme adiante na Tabela 3.

Tabela 3 - Aferições Centrais de Água Gelada em carga máxima, operando individualmente

Equipamento	Infra 1			Infra 2		
	URL-01	URL-02	URL-03	URL-04	URL-05	URL-06
Vazão de Água Gelada $\dot{m}_{ag}$ [L/s]	105,3	105,0	45,8	105,0	105,0	45,8
Temp. Entrada Água Gelada $T_{ent,ag}$ [°C]	15,2	15,0	15,2	16,9	17,7	16,1
Temp. Saída Água Gelada $T_{sai,ag}$ [°C]	10,3	10,3	8,9	12,5	11,6	9,8
Temp. Entrada Água Condens. $T_{ent,ac}$ [°C]	29,4	29,4	31,2	30,7	30,6	33,0
Temp. Saída Água Condens. $T_{sai,ac}$ [°C]	34,0	34,0	37,2	35,6	34,4	38,6
Tensão Média nas Fases [V]	470,3	471,3	468,3	475,0	477,3	473,3
Corrente Média nas Fases [A]	519,0	522,3	272,7	521,7	522,3	278,7
Capacidade Percentual [%]	97,1	97,1	98,2	97,4	98,2	101,5

Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Na etapa seguinte, as Unidades Resfriadoras de Líquido (URLs) foram avaliadas operando de forma conjunta, explorando suas maiores capacidades possíveis, conforme apresentado na Tabela 4. Para simular a condição de operação integrada do sistema, todas as torres de resfriamento foram acionadas, garantindo suporte adequado à dissipação térmica.

Tabela 4 - Aferições Centrais de Água Gelada em carga máxima, operando conjuntamente com todas as torres de resfriamento em operação.

Equipamento	Infra 1			Infra 2		
	URL-01	URL-02	URL-03	URL-04	URL-05	URL-06
Vazão de Água Gelada $\dot{m}_{a,g}$ [L/s]	105,0	105	45,8	100,1	105,0	45,8
Temp. Entrada Água Gelada $T_{ent,ag}$ [°C]	10,7	10,6	10,7	12,8	13,3	13,0
Temp. Saída Água Gelada $T_{sai,ag}$ [°C]	6,3	6,6	5,7	8,8	7,7	7,6
Temp. Entrada Água Condens. $T_{ent,ag}$ [°C]	31,0	31,0	31,1	30,4	30,3	30,3
Temp. Saída Água Condens. $T_{ent,ag}$ [°C]	35,4	35,3	37,2	35,4	34,1	35,9
Capacidade Percentual [%]	92,9	93,5	96,1	95,0	92,0	89,0

Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Por fim, foi realizado um teste com o objetivo de simular a capacidade máxima dos *chillers* sob uma condição crítica de temperatura de condensação. Para isso, a temperatura da

água de condensação fornecida pelas torres de resfriamento foi elevada para aproximadamente 37,5 °C, representando um cenário de maior exigência térmica.

Durante este ensaio, foram mantidas em operação as três Unidades Resfriadores de Líquido (URLs) e a mesma quantidade de bombas utilizada no teste anterior. Contudo, duas torres de resfriamento foram deliberadamente desligadas, com a finalidade de reduzir a capacidade de dissipação térmica e, conseqüentemente, forçar o aumento da temperatura da água de condensação. Os resultados obtidos nesse teste estão apresentados na Tabela 5, permitindo a análise do comportamento dos *chillers* em regime crítico e a verificação dos limites operacionais do sistema.

Tabela 5 - Aferições realizadas nos *chillers* em carga máxima, operando conjuntamente com temperatura de entrada da água de condensação

Equipamento	Infra 1		
	URL-01	URL-02	URL-03
Vazão de Água Gelada $\dot{m}_{a,g}$ [L/s]	105,0	105	45,8
Temp. Entrada Água Gelada $T_{ent,ag}$ [°C]	14,2	14,2	14,3
Temp. Saída Água Gelada $T_{sai,ag}$ [°C]	10,3	10,8	9,4
Temp. Entrada Água Condens. $T_{ent,ag}$ [°C]	36,2	36,2	36,2
Temp. Saída Água Condens. $T_{ent,ag}$ [°C]	40,1	39,8	42,0
Capacidade Percentual [%]	91,2	86,4	97,1

Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Para determinar a capacidade máxima do sistema, inicialmente foi realizada a análise de desempenho individual de cada equipamento. Em seguida, procedeu-se à avaliação da operação simultânea de todas as Unidades Resfriadores de Líquido (URLs), buscando identificar a capacidade máxima da Central de Água Gelada (CAG) em condições críticas. Ressalta-se que, quando operadas individualmente, as máquinas podem apresentar capacidades superiores às verificadas na operação conjunta; entretanto, essa condição não representa o cenário real de máxima carga da CAG, pois, ao operarem simultaneamente, as torres de resfriamento assumem uma carga térmica significativamente maior, atingindo seus limites operacionais e fornecendo água de condensação a temperaturas mais elevadas do que nos testes individualizados.

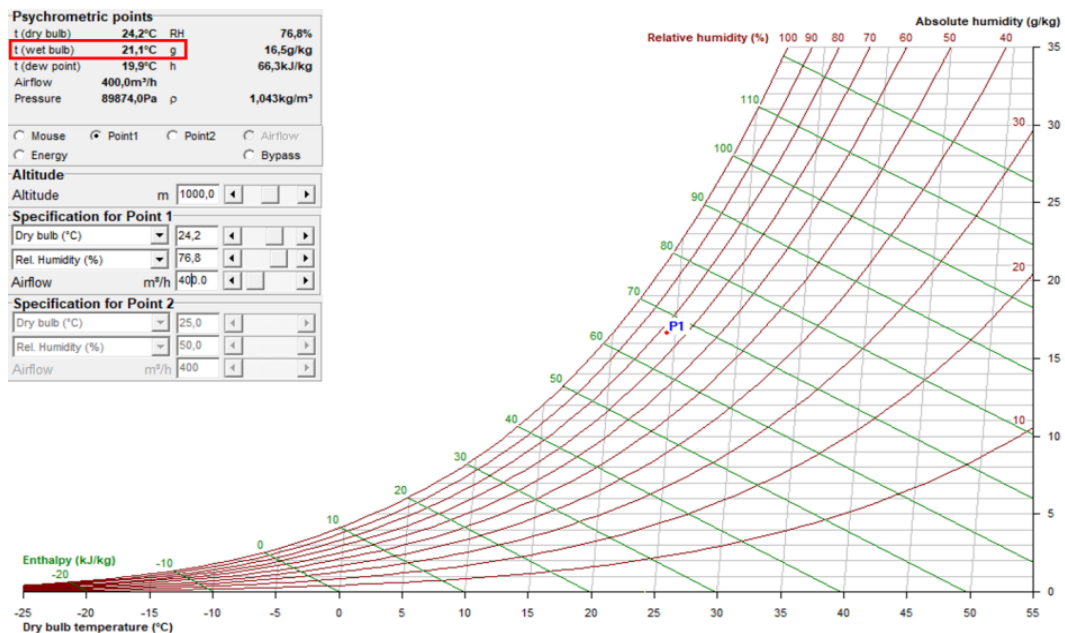
Conforme estabelecido nas premissas do estudo, a análise considerou valores aferidos em campo e dados obtidos do sistema de gerenciamento predial (BMS), assumidos como corretos para as avaliações. Todas as análises foram realizadas considerando as condições críticas definidas pela ASHRAE Fundamentals 2021, para a condição N = 50 em Brasília-DF (WMO: 833780). As condições climáticas externas adotadas foram:

- Máxima temperatura de bulbo seco externa ($TBSar, ext, máx$) = 37,1°C
- Máxima Temperatura de Bulbo Úmido externa ($TBUar, ext, máx$) = 27,5°C

A partir das medições realizadas nas torres de arrefecimento de cada Central de Água de Condensação (CAC), operando em condições críticas — ou seja, com os três *chillers* de cada CAG em plena carga e as quatro torres de cada CAC operando simultaneamente — foi possível calcular o *approach* crítico das torres. O *approach* é definido pela diferença entre a temperatura de bulbo úmido do ar admitido pelas torres ($TBUar, ext$) e a temperatura média da água na saída das torres ($TBUagua, méd$)

No caso analisado, as aferições indicaram temperatura externa de bulbo seco de 24,2 °C e umidade relativa de 76,8%. Por meio de cálculo psicrométrico, obteve-se uma temperatura de bulbo úmido (TBU) de 21,1 °C, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Ponto da condição externa na carta psicrométrica



Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Assim, tendo aferido em campo o valor médio da saída de água das torres de arrefecimento de 31,1°C, e conhecendo o $TBU_{ar, ext}$, foi possível calcular, a partir da equação 1 o *approach* das torres.

$$\text{Approach} = TBU_{agua, méd} - TBU_{ar, ex} \quad \text{Equação (2)}$$

$$\text{Approach} = 10^\circ$$

Figura 10 – TBU máxima da região, *ASHRAE Fundamentals 2021*

BRASILIA, BRAZIL (WMO: 833780)

Lat:15.863S

Long:47.913W

Elev:1060

StdP: 89.22

Time zone:-3.00 (SAB)

Period:94-19

WBAN:99999

Annual Heating, Humidification, and Ventilation Design Conditions

Coldest Month	Heating DB		Humidification DP/MCDB and HR						Coldest month WS/MCDB				MCWS/PCWD to 99.6% DB		WSF
			99.6%			99%			0.4%		1%				
	99.6%	99%	DP	HR	MCDB	DP	HR	MCDB	WS	MCDB	WS	MCDB	MCWS	PCWD	
	7	10.1	11.2	1.0	4.6	27.0	2.9	5.3	25.7	8.9	21.5	8.0	21.8	0.6	

Annual Cooling, Dehumidification, and Enthalpy Design Conditions

Hottest Month	Hottest Month DB Range	Cooling DB/MCWB						Evaporation WB/MCDB						MCWS/PCWD to 0.4% DB	
		0.4%		1%		2%		0.4%		1%		2%			
		DB	MCWB	DB	MCWB	DB	MCWB	WB	MCDB	WB	MCDB	WB	MCDB	MCWS	PCWD
		10	11.5	32.8	17.4	31.8	17.6	30.9	18.1	22.2	26.5	21.7	26.1	21.4	25.9

Dehumidification DP/MCDB and HR									Enthalpy/MCDB							Extreme Max WB
0.4%			1%			2%			0.4%		1%		2%			
DP	HR	MCDB	DP	HR	MCDB	DP	HR	MCDB	Enth	MCDB	Enth	MCDB	Enth	MCDB		
21.1	18.0	23.5	20.7	17.5	23.2	20.1	16.9	22.8	71.0	26.9	69.1	25.9	67.6	25.8	27.5	

Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Diante do *approach* calculado, calculou-se a temperatura crítica com a qual a água poderá sair das torres de arrefecimento em 37,5 °C, uma vez que a TBU crítica determinada pela ASHRAE Fundamentals 2021 para Brasília-DF ($TBU_{ar, ASHRAE, n=50}$) quando $n=50$ é de em 27,5°C, conforme mostra a Figura 10. Essa é a temperatura crítica de recebimento da água de condensação pelos *chillers*, que terá influência direta na sua capacidade, pois quanto maior a temperatura de recebimento da água de condensação, menor a capacidade do *chiller*.

Em outra análise, a partir dos dados aferidos em campo e dos dados do BMS, foi calculada a capacidade máxima do conjunto de 4 torres operando simultaneamente ($Q_{conj, torres}$), pela equação abaixo. Para isso, foram utilizados a vazão de água de condensação total (*massa água, cond, tot*) de 311,1 L/s, a TBU de admissão das torres de 22,1 °C o gradiente (ΔT) de 4,90°C entre a temperatura da água na entrada (35,6 °C) na saída das torres (30,7 °C), obtidos do BMS:

$$Q_{conj, torres} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T \quad \text{Equação (3)}$$

$$Q_{conj, torres} = 1.818,9 \text{ TR}$$

Nessas condições, as 4 torres são capazes de retirar 1.818,9 TR de calor, o que resulta em 454,7 TR de capacidade por torre de arrefecimento, quando operando nas condições de temperatura acima descritas. Para ajustar então o desempenho das torres para a condição ambiental crítica, a performance acima calculada foi extrapolada, a partir da performance observada em seleções do fabricante para esse equipamento, para a condição de entrada do ar de $T_{BU} = 27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, resultando em 1.498,9 TR para o conjunto de quatro torres. Estimou-se então o fator de dissipação de calor 0,7 para as perdas associadas na torre e para dissipações de ineficiências do sistema (*chiller* + torres + BACs) e obteve-se o valor de capacidade líquida capaz de ser convertido em água gelada de 1.049,2 TR para cada conjunto de quatro torres, que equivale a capacidade de remoção de calor de 262,3 TR por torre de arrefecimento.

Para análise inicial dos *chillers*, os equipamentos do tipo centrífugos de cada infra foram avaliados operando individualmente e em carga máxima e os equipamentos do tipo parafuso foram avaliados em carga máxima, conjuntamente com um equipamento do tipo centrífugo para remoção da carga térmica residual do sistema. A seguir, mostra as máximas capacidades individualizadas calculadas para cada equipamento nas condições do teste. Para o cálculo das máximas capacidades foi utilizada as informações da Tabela 6 e a Equação abaixo.

$$Q = m \cdot C \cdot \Delta T \quad \text{Equação (4)}$$

A Tabela 6 apresenta os valores de capacidade máxima por equipamento operando de forma individualizada.

Tabela 6 - Máximas capacidades corrigidas para cada *chiller*, operando individualmente

	URL-01	URL-02	URL-03	URL-04	URL-05	URL-06
Capacidade Máxima $Q_{\text{máx}}$ [TR]	615,0	589,9	339,0	552,3	476,0	307,3

Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Após a avaliação individual apresentada acima, foram realizadas 3 análises conjuntas de capacidade dos *chillers*. Nessas análises, como o sistema foi avaliado em conjunto, as torres de resfriamento, bombas de água primárias e bomba de água de condensação também fizeram parte da análise e os resultados já representam a performance conjunta desses subsistemas.

As duas primeiras análises conjuntas foram realizadas na CAGs 1 e 2 separadamente, ligando todos os *chillers* em simultâneo, bem como todas as torres de resfriamento. Com o sistema em regime transiente, as condições de performance foram registradas e a capacidade da CAG calculada, conforme apresentado na Tabela 7 abaixo:

Tabela 7 - Capacidades das CAGs com todas as torres de resfriamento em operação

Equipamento	Infra 1			Infra 2		
	URL-01	URL-02	URL-03	URL-04	URL-05	URL-06
Vazão de Água Gelada $\dot{m}_{a,g}$ [L/s]	105,0	105	45,8	100,1	105,0	45,8
Temp. Entrada Água Gelada $T_{ent,ag}$ [°C]	10,7	10,6	10,7	12,8	13,3	13,0
Temp. Saída Água Gelada $T_{sai,ag}$ [°C]	6,3	6,6	5,7	8,8	7,7	7,6
Temp. Entrada Água Condens. $T_{ent,ag}$ [°C]	31,0	31,0	31,1	30,4	30,3	30,3
Temp. Saída Água Condens. $T_{ent,ag}$ [°C]	35,4	35,3	37,2	35,4	34,1	35,9
Capacidade Percentual [%]	92,9	93,5	96,1	95,0	92,0	89,0
Capacidade [TR]	552,8	501,1	274,4	477,7	625,4	443,9
Capacidade da CAG [TR]	1328,4			1547,1		

Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Essas análises já fornecem um primeiro parecer sobre a capacidade do sistema operando. No entanto, dois fatores estão fora da operação em condição crítica:

- A temperatura de fornecimento de água gelada pelos *chillers* que varia de 6,3 °C a 8,8 °C. O *setpoint* padrão desse parâmetro hoje é 12 °C. No entanto, estima-se que futuramente seja reduzido a pelo menos 10 °C, valor que objetivamos avaliar;
- A temperatura de recebimento da água de condensação (fria) pelo *chiller*, que variou de 31,0 °C no teste da Infra 1 e 30,3 °C no teste da Infra 2. Conforme já apresentado na avaliação das torres de resfriamento, estima-se que as torres de resfriamento forneçam água a 37,5 °C na condição climática crítica.

Portanto, numa terceira análise, 2 torres de condensação foram desligadas com o objetivo de aumentar gradualmente a temperatura de fornecimento da água de condensação até se aproximar do valor estimado de 37,5 °C (condição climática crítica). A performance do sistema foi registrada quando a temperatura de fornecimento da água gelada estava próxima de 10 °C. Os resultados são apresentados na Tabela 8 abaixo:

Tabela 8: Capacidade das CAGs com as limitações nas torres de resfriamento para aumentar a temperatura da água de condensação

Equipamento	Infra 1		
	URL-01	URL-02	URL-03
Vazão de Água Gelada $\dot{m}_{a,g}$ [L/s]	105,0	105	45,8
Temp. Entrada Água Gelada $T_{ent,ag}$ [°C]	14,2	14,2	14,3
Temp. Saída Água Gelada $T_{sai,ag}$ [°C]	10,3	10,8	9,4
Temp. Entrada Água Condens. $T_{ent,ag}$ [°C]	36,2	36,2	36,2
Temp. Saída Água Condens. $T_{ent,ag}$ [°C]	40,1	39,8	42,0
Capacidade Percentual [%]	91,2	86,4	97,1
Capacidade [TR]	490,0	426,0	267,8
Capacidade da CAG [TR]	1183,7		

Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Este terceiro teste demonstra uma redução de pelo menos 11% na capacidade do sistema quando aumentada a temperatura de fornecimento da água de condensação para o *chillers* (água fria) de aproximadamente 31,0 °C para 36,2 °C. A perda é ainda maior se considerarmos que a temperatura de saída de água gelada também aumentou, e isso beneficiou o sistema.

No entanto, mesmo após o terceiro teste, ainda não chegamos na performance da condição crítica com temperatura da água de condensação em 37,5 °C. Uma vez que não foi possível testar em campo essa circunstância, as performance dos *chillers* registrada nas diversas condições de operação foi levada para uma regressão matemática para traçar curvas de performance que melhor representassem o comportamento dos equipamentos e a partir dessas curvas fosse realizado o ajuste final da temperatura de fornecimento da água de condensação. O resultado é apresentado na tabela a seguir na Tabela 9:

Tabela 9 – Resultado da performance da CAG

Equipamento	URL-01/04	URL-02/05	URL-03/06
Vazão de Água Gelada $\dot{m}_{a,g}$ [L/s]	105,0	105	45,8
Temp. Saída Água Gelada $T_{sai,ag}$ (setpoint) [°C]	10,0	10,0	10,0
TBU ASHRAE N = 50 [°C]	27,5	27,5	27,5
Approach das torres de resfriamento (verificado em campo) [°C]	10	10	10
Temp. Entrada Água Condens. $T_{ent,ag}$ [°C]	37,5	37,5	37,5
Capacidade [TR]	386,8	386,8	259,0
Capacidade da CAG [TR]	1032,6		

Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Com as análises acima, estima-se que para a condição crítica de temperatura de bulbo úmido de 27,5 °C requisitada pela ASHRAE, com um approach de 10 °C na performance das torres verificado em campo, e um fornecimento de água gelada pelos *chillers* de 10 °C, a capacidade de resfriamento de líquido da CAG é de 1.032,6 TR em cada uma das infraestruturas.

O sistema geral de fornecimento de água gelada apresenta funcionamento adequado, porém com oportunidades de melhoria que atualmente limitam sua operação otimizada, reduzindo tanto a capacidade quanto a eficiência energética. Com base nos testes operacionais realizados em campo e nas análises das curvas de performance dos equipamentos, verificou-se que cada Central de Água Gelada (CAG), mantendo a topologia de redundância 2N, é capaz de entregar até 1.032 TR de capacidade quando fornecendo água gelada a 10 °C e operando sob condição ambiental crítica.

Entretanto, foram identificados desafios que impactam diretamente na redução da capacidade do sistema, relacionados a aspectos técnicos e operacionais, os quais serão detalhados a seguir.

- Redução na capacidade de rejeição de calor dos *chillers* para o sistema de condensação, ou seja, a condensadora de cada equipamento não está trocando calor de forma eficiente;
- Limitação na capacidade de rejeição de calor do sistema de condensação para a atmosfera em relação ao especificado em projeto, ou seja, problemas nas torres ou até mesmo ineficiência de fluxo de ar exterior.

3.1 REDUÇÃO NA CAPACIDADE DE REJEIÇÃO DE CALOR DOS *CHILLERS* PARA O SISTEMA DE CONDENSAÇÃO

O *approach* na condensadora dos *chillers* é a diferença de temperatura entre o fluido refrigerante (geralmente na saída do condensador) e o meio de rejeição de calor (ar ambiente ou água de resfriamento). No sistema estudado a média foi de 3,2 °C, o que é, em geral, um valor alto para um trocador de calor. O fabricante não especificou com clareza o *approach* esperado para esse trocador de calor. Como valor de referência de um trocador de calor com o mesmo tempo de operação, tomamos o evaporador como referência, que trabalha com *approachs* médios de 1 °C, três vezes inferior ao verificado no condensador.

O alto *approach* no condensador indica o déficit na capacidade do *chiller* de rejeitar calor para a água de condensação. Nessa condição, o fluido refrigerante tende a operar com temperaturas no condensador maiores, reduzindo assim a sua capacidade e eficiência, prejudicando a performance geral da máquina. Além disso, ao rejeitar menos calor para a água de condensação, essa água sai do condensador com temperatura menores, impactando também negativamente na performance das torres de resfriamento.

Principalmente em dias mais quentes e úmidos, quando as torres de resfriamento fornecerão água de condensação a temperaturas mais elevadas, a capacidade do *chiller* será impactada e estará limitada ao seu potencial de rejeitar calor nas trocas térmicas do condensador. Essa limitação de rejeitar calor pelo condensador é a principal razão encontrada para os *chillers* terem reduzido a sua capacidade máxima em mais de 20% quando operando com temperaturas da água de 36,2 °C, quando comparadas às seleções iniciais.

A análise do *approach* térmico no condensador dos *chillers* revela uma limitação significativa na capacidade de rejeição de calor do sistema. O valor médio de 3,2 °C é elevado para um trocador de calor com tempo de operação semelhante ao do evaporador, que apresenta um *approach* médio de apenas 1 °C. Essa diferença indica que o condensador está operando com eficiência reduzida, o que compromete diretamente a performance dos *chillers*.

A consequência direta é o aumento da temperatura do fluido refrigerante no condensador, reduzindo a capacidade de refrigeração e a eficiência energética do equipamento. Além disso, a menor transferência de calor para a água de condensação impacta negativamente o desempenho das torres de resfriamento, especialmente em condições climáticas adversas, como dias quentes e úmidos.

Essa limitação foi evidenciada pela redução de mais de 20% na capacidade máxima dos *chillers* quando operando com água de condensação a 36,2 °C, em comparação com as

condições de seleção inicial. Portanto, é essencial considerar intervenções técnicas para melhorar a eficiência térmica do condensador, seja por meio de manutenção, *retrofit* ou reavaliação do projeto de rejeição de calor, visando restaurar a capacidade plena dos *chillers* e garantir a confiabilidade do sistema de climatização.

3.2 LIMITAÇÃO NA CAPACIDADE DE REJEIÇÃO DE CALOR DO SISTEMA DE CONDENSAÇÃO PARA A ATMOSFERA EM RELAÇÃO AO ESPECIFICADO EM PROJETO

As aferições realizadas na temperatura de admissão de ar das torres de resfriamento e no fornecimento de água de condensação fria para os *chillers* indicaram queda na performance das torres de rejeitar calor para a atmosfera, em relação ao projetado originalmente. O approach entre a temperatura de bulbo úmido do ar na entrada da torre, e a temperatura de água fria fornecida aos *chillers* chegou a 10 °C, quando o projetado para a torre instalada é de 5,5 °C, aumento de mais de 60%. Tamanho aumento resulta em temperatura de fornecimento de água para os *chillers* maior. Em cargas parciais, é possível compensar esse aumento com o acionamento de torres extras, além do inicialmente previsto. No entanto, em cenário de carga plena, não será possível acionar torres extras, e a capacidade das torres ficará restrita ao approach de 10 °C. Em condições de temperatura elevadas, esse aumento na temperatura da água de condensação fornecida para os *chillers* impacta diretamente a sua capacidade máxima e eficiência, sendo o segundo fator para a redução de 20% ou mais na capacidade do *chiller*.

Em sequência, os *chillers* foram aferidos operando conjuntamente e com suas maiores capacidades possíveis, conforme a Tabela 8 abaixo. Nesse caso, as torres de resfriamento foram todas acionadas para simular a operação conjunta de todos esses sistemas. Os pontos apresentados foram registrados em regime transiente, em torno de 30 minutos cada sistema, uma vez que não há carga estável no edifício para estabilizar o regime de operação da CAG a plena carga (Tabela 8).

No cenário crítico, espera-se redução da eficiência dos *chillers*, aumento da pressão de condensação e maior consumo energético. A operação conjunta tende a apresentar interações hidráulicas e térmicas que podem alterar vazões e temperaturas, especialmente em regime transiente. Os ajustes de vazão nas CAGs 05 e 06 indicam inconsistências iniciais que foram corrigidas.

Do ponto vista termodinâmico, verificamos que Elevação da temperatura de condensação (37,5 °C) implica aumento da pressão no condensador, maior trabalho do

compressor e menor COP (Coeficiente de Performance). Em regime transiente, sem carga estável, os *chillers* podem operar fora do ponto ótimo, com flutuações de temperatura e pressão.

Um ponto de extrema importância, é que ficou claro nos dados obtidos, é a discrepância observada no *approach* das condensadoras, dependendo do modo de operação dos *chillers* (em conjunto ou individualmente), revelou uma falha na interpretação dos dados pelo fabricante em relação aos procedimentos de manutenção preventiva.

Quando os *chillers* operam em paralelo para atender a uma demanda baixa, a carga térmica é dividida de forma desigual. Isso faz com que cada condensadora trabalhe com menor eficiência. O resultado é um alto *approach*, que, erroneamente, seria interpretado como uma indicação de incrustação, recomendando a limpeza preventiva. Esse cenário induziu o fabricante a um diagnóstico equivocado. Ao operar os *chillers* individualmente, cada equipamento trabalha sob uma carga mais próxima de seu ponto ideal de eficiência. Essa condição permite uma transferência de calor mais eficaz, resultando em um baixo *approach*.

Mesmo com um cálculo mais assertivo, a análise do *approach* obtido, levou a percepção de possibilidade de incrustação, necessitando de manutenção corretiva para os equipamentos.

A análise detalhada do desempenho das torres de resfriamento e dos *chillers* em operação conjunta revelou limitações significativas na capacidade de rejeição de calor do sistema, especialmente em condições de carga plena e temperaturas elevadas. O aumento do *approach* das torres para 10 °C — 60% acima do valor projetado — compromete diretamente a temperatura da água de condensação fornecida aos *chillers*, impactando negativamente sua eficiência e capacidade máxima.

A operação conjunta dos *chillers*, em regime transiente e sem carga estável, evidenciou variações térmicas e hidráulicas que afetam o equilíbrio do sistema. A elevação da temperatura de condensação para 37,5 °C implica maior pressão no condensador, aumento do trabalho do compressor e redução do COP, intensificando o consumo energético e diminuindo a eficiência geral.

Um ponto crítico identificado foi a interpretação equivocada dos dados de *approach* pelas equipes de manutenção. A operação dos *chillers* em paralelo, sob baixa carga, induz a um alto *approach* nas condensadoras, que pode ser erroneamente atribuído à incrustações. Essa leitura incorreta levou a recomendações de manutenção preventiva inadequadas. A operação individual dos *chillers*, por outro lado, demonstrou melhor desempenho térmico, com *approachs* mais baixos e condizentes com a eficiência esperada.

Portanto, é essencial revisar os critérios de avaliação de desempenho dos *chillers* e das torres de resfriamento, considerando os modos de operação e as condições reais de carga. A adoção de estratégias de operação mais alinhadas com os pontos ótimos de eficiência dos equipamentos, aliada a uma análise mais precisa dos dados operacionais, pode evitar diagnósticos incorretos e garantir maior confiabilidade e desempenho ao sistema de climatização.

4 DISCUSSÃO E RESULTADOS

A realização de manutenção em *chillers* é de suma importância em virtude dos benefícios que proporciona para a eficiência operacional, a vida útil do equipamento e a qualidade do ambiente interno. Os *chillers* são componentes críticos em sistemas de refrigeração e ar-condicionado, responsáveis pela remoção de calor de espaços ou processos industriais. A ausência de manutenção adequada pode resultar em uma série de problemas, principalmente, perda de eficiência energética, aumento nos custos operacionais, falhas no sistema e diminuição da qualidade do ar interior. A manutenção regular dos *chillers* visa prevenir tais problemas, e garante o funcionamento eficiente e confiável do equipamento (Carneiro, 2020).

A presença de incrustações nos condensadores compromete significativamente a eficiência da troca térmica, elevando a temperatura de condensação (T_{cond}) e, conseqüentemente, a pressão de descarga do refrigerante. Esse aumento de pressão exige maior esforço do compressor para manter o ciclo de refrigeração, resultando em maior consumo energético e desgaste mecânico. A resistência térmica adicional causada pelas incrustações atua como uma barreira à transferência de calor, elevando o *approach* e reduzindo a capacidade de dissipação térmica do sistema.

Para garantir o desempenho térmico ideal dos *chillers* e suas unidades condensadoras, é fundamental adotar práticas de manutenção preventiva e corretiva baseadas em normas técnicas. A limpeza química dos tubos do condensador deve ser realizada com produtos específicos que removam incrustações, biofilmes e depósitos minerais, sem causar corrosão às superfícies metálicas. Esse procedimento deve ser precedido por um diagnóstico da condição térmica e seguido por um enxágue e passivação química. O envareamento mecânico, utilizando escovas ou varetas apropriadas, complementa a limpeza química ao remover incrustações mais aderidas, assegurando a restauração da área de troca térmica.

No escopo deste estudo, não foram realizadas intervenções físicas nas torres de resfriamento, limitando-se a ajustes operacionais em seu funcionamento. As ações de melhoria concentraram-se no sistema de condensação dos chillers, com foco na limpeza química dos condensadores. Essa intervenção teve como objetivo a remoção de incrustações e depósitos minerais que comprometem a transferência de calor, fenômeno conhecido como *fouling*. A redução do *fouling* resultou em menor resistência térmica, promovendo a queda da temperatura de condensação (T_{cond}) e, por consequência, a redução da pressão de descarga do refrigerante. Esse efeito diminui o esforço exigido do compressor, reduzindo o consumo energético e melhorando a eficiência global do sistema de refrigeração.

As medidas apresentadas acima devem ser implementadas gradualmente e seguindo estudos e avaliações preliminares sempre que possível. Uma vez implementadas, acredita-se que a CAG será capaz de melhorar sua capacidade em relação à condição atual. Na condição atual estima-se que o sistema seja capaz de entregar ao bombeamento secundário 1.032 TR de capacidade a partir das avaliações matemáticas de extrapolação dos testes reais para as condições de fornecimento de água a 10 °C e condição ambiental crítica de 27,5 °C.

4.1 LIMPEZA QUÍMICA DOS *CHILLERS*

A limpeza química é uma prática essencial na manutenção de equipamentos térmicos industriais, como caldeiras, trocadores de calor, reatores, dutos e *chillers*. Este procedimento visa à remoção de incrustações e depósitos formados durante a operação dos sistemas, os quais comprometem a eficiência térmica e a integridade dos componentes (Gemelli, 2024).

Em sistemas abertos com recirculação, a presença de processos corrosivos e a formação de depósitos são fenômenos recorrentes, resultantes da interação entre a água de reposição e o ambiente externo. Esses depósitos acumulam-se nas superfícies de troca térmica, reduzindo significativamente a eficiência dos equipamentos, aumentando o esforço operacional das bombas e elevando o consumo energético (Salles & Castro, 2023).

A formação de incrustações está associada a diversos fatores, como a absorção de partículas orgânicas e inorgânicas pelas torres de resfriamento em operação, presença de sílica coloidal, sais de cálcio e magnésio na água de reposição, deficiência ou ausência de sistemas de filtração, elevados teores de ferro solúvel, ciclos de concentração excessivos devido à ausência de purgas adequadas, e altos níveis de dureza total e de sais incrustantes (Costa et al., 2025).

Para mitigar esses efeitos e preservar a eficiência dos sistemas, recomenda-se a adoção de medidas preventivas, como o uso de água de alimentação previamente tratada, controle rigoroso dos ciclos de concentração, limpeza periódica das torres de resfriamento, instalação das torres em locais afastados de fontes de poluição atmosférica ou de obras civis, aplicação de tratamentos químicos específicos e realização de manutenções preventivas nos condensadores (MD Refrigeração, 2025).

Uma vez que havia uma grande discrepância nas horas de funcionamento das CAGs, ficou definido que a primeira central que iria passar pela intervenção seria a CAG 2, enquanto a CAG 1 permaneceria em operação buscando a equalização do rodízio por horas de funcionamento. Cada intervenção levou dois dias, sendo o primeiro para preparação da máquina e estrutura de recirculação dos agentes químicos e o segundo para execução da atividade.

Tal ação foi executada em conjunto com a empresa de manutenção (responsável pela abertura e fechamento dos equipamentos e limpeza mecânica) e fornecedora de produto para limpeza (fornecimento e recirculação dos agentes químicos para dissolução das incrustações, neutralização da solução e passivação química para proteção das superfícies).

As intervenções de limpeza química nos condensadores dos *chillers* das Centrais de Água Gelada (CAGs) foram realizadas conforme cronograma previamente definido, com o objetivo de restaurar a eficiência térmica dos equipamentos e promover o balanceamento operacional entre as centrais. A CAG 2 foi priorizada para as primeiras intervenções, em função de sua maior carga horária acumulada de operação em relação à CAG 1. As atividades de limpeza química na CAG 2 ocorreram em três etapas, nos dias 27 e 28 de março, 10 e 11 de abril, e 24 e 25 de abril de 2024. Posteriormente, os equipamentos da CAG 1 foram submetidos ao mesmo processo nos dias 08 e 09 de maio, 22 e 23 de maio, e 10 e 11 de junho de 2024.

Para avaliar os efeitos da limpeza química sobre o desempenho dos *chillers*, foram analisados os dados operacionais extraídos do sistema de monitoramento das centrais. A metodologia adotada considerou períodos de amostragem que englobam aproximadamente um mês anterior e um mês posterior às intervenções, permitindo uma análise comparativa entre os cenários pré e pós-manutenção.

Na CAG 2, o intervalo de análise compreendeu o período de 12 de fevereiro a 12 de junho de 2024, enquanto na CAG 1, os dados foram avaliados entre 24 de março e 07 de julho de 2024. Essa abordagem permitiu observar variações nos parâmetros operacionais dos *chillers*, como temperatura de condensação, pressão de operação, consumo energético e eficiência térmica, contribuindo para a validação da eficácia do procedimento de limpeza química.

Tabela 10 – Comparativo RLA e *approach*

Equipamento	RLA (%) Antes da limpeza	RLA (%) Após limpeza	Approach (°C) Antes da limpeza	Approach (°C) Após limpeza
URL 1	92,4	97,5	5,6	1,9
URL 2	89,7	97,5	6,1	2,5
URL 3	84,0	96,0	4,7	3,9
URL 4	87,5	96,8	5,7	1,6
URL 5	94,3	97,6	6,9	2,0
URL 6	93,5	95,6	5,1	3,6

Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024)

A eficiência térmica melhorou significativamente variando do antes da limpeza e após limpeza, evidenciada pela redução do *approach*, que indica menor resistência térmica na troca de calor. Esse ganho reflete diretamente na performance do ciclo de refrigeração, pois a menor diferença de temperatura entre o refrigerante e a água do condensador reduz a pressão de descarga e, conseqüentemente, o esforço do compressor. Além disso, o aumento do RLA demonstra que os *chillers* estão operando mais próximos da capacidade nominal, ou seja, 100%, o que sugere maior estabilidade operacional e menor consumo energético por tonelada de refrigeração. Essa melhoria contribui para prolongar a vida útil dos equipamentos, reduzir custos de manutenção corretiva e otimizar o desempenho global do sistema, alinhando-se às práticas de eficiência energética (ABNT, 2018).

4.2 CONSUMO REFRIGERAÇÃO TR X CONSUMO ENERGIA ELÉTRICA KW

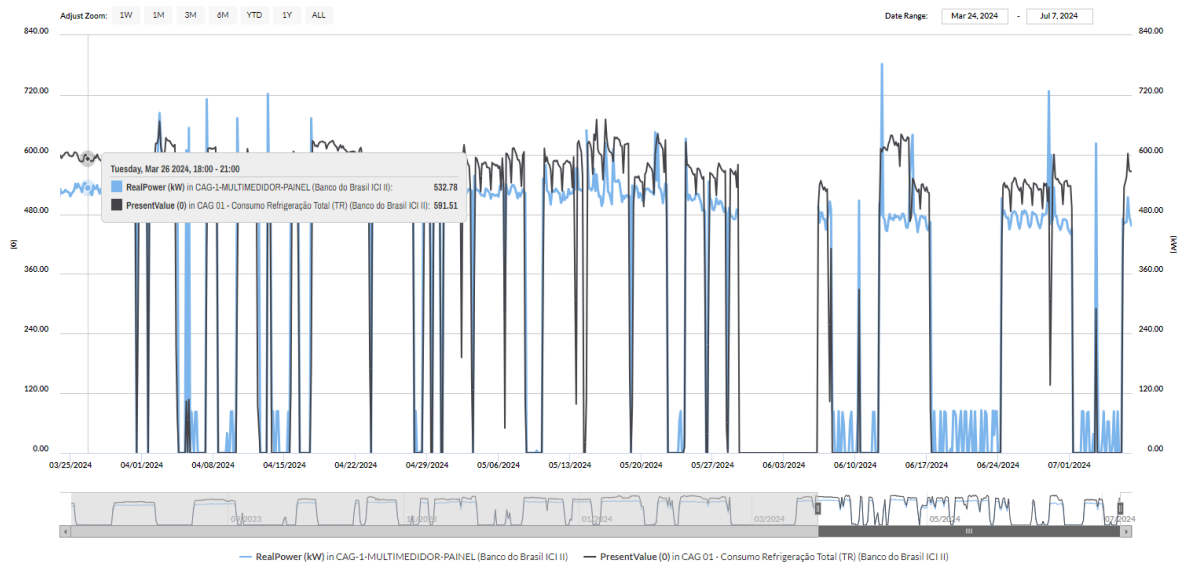
Todas as medições de consumo elétrico foram obtidas diretamente a partir do painel geral de cada Central de Água Gelada (CAG), garantindo a confiabilidade dos dados utilizados na análise. Essa abordagem permitiu correlacionar o impacto das intervenções de calibração com a variação real do consumo energético do sistema. A utilização de dados provenientes do painel assegura a representatividade das informações para avaliação da eficiência operacional antes e após a manutenção.

A relação entre o consumo de refrigeração, expresso em toneladas de refrigeração (TR), e o consumo de energia elétrica, medido em quilowatts (kW), constitui um indicador fundamental de eficiência energética em sistemas de climatização. Essa correlação permite avaliar o desempenho do *chiller*, identificando variações na carga térmica atendida em função

da potência elétrica demandada. A análise dessa razão é essencial para otimizar a operação das Centrais de Água Gelada, garantindo maior eficiência e redução de custos operacionais.

Entretanto, é importante destacar a inexistência de análise de incerteza ou erro experimental nos dados utilizados. As medições de temperatura, vazão e potência elétrica não apresentara informações sobre a margem de erro ou a precisão dos instrumentos empregados. Essa limitação deve ser considerada na interpretação dos resultados, uma vez que pode influenciar a confiabilidade das conclusões obtidas. A integração coerente desses dados, mesmo sem especificações de incerteza, ainda permite uma avaliação qualitativa do desempenho energético, mas recomenda-se cautela na extrapolação dos resultados e na tomada de decisões baseadas exclusivamente nesses indicadores. Para a centra de água gelada 1 (CAG 1), foram coletadas as informações abaixo:

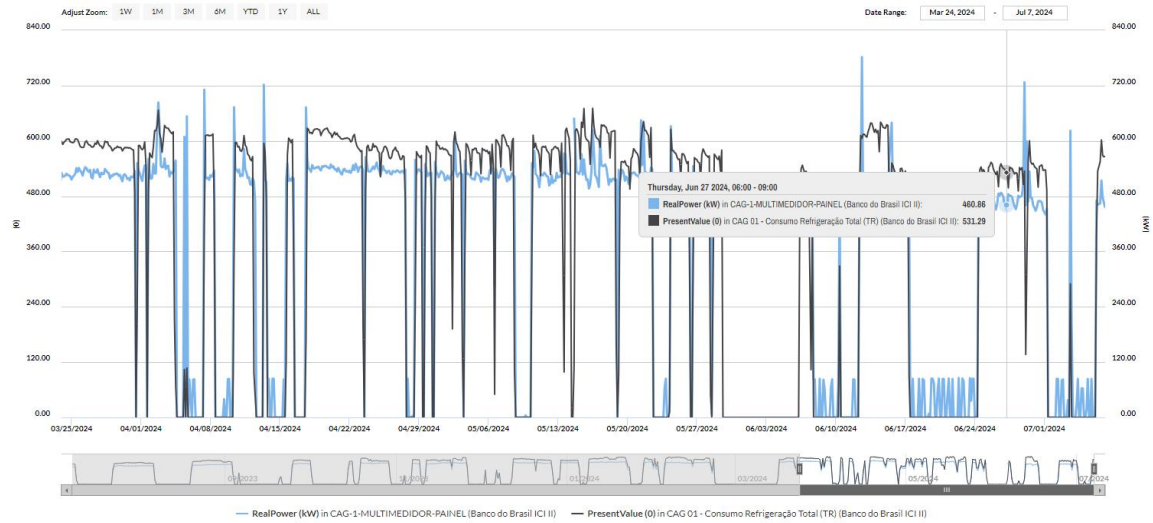
Figura 11 - CAG 1: Consumo Refrigeração x Energia Elétrica – Pré Limpeza Condensadores.



Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Na Figura 11 apresenta as grandezas registradas em data anterior a limpeza química dos *chillers* da CAG 1, onde são consumidos 0,90kW por TR produzido.

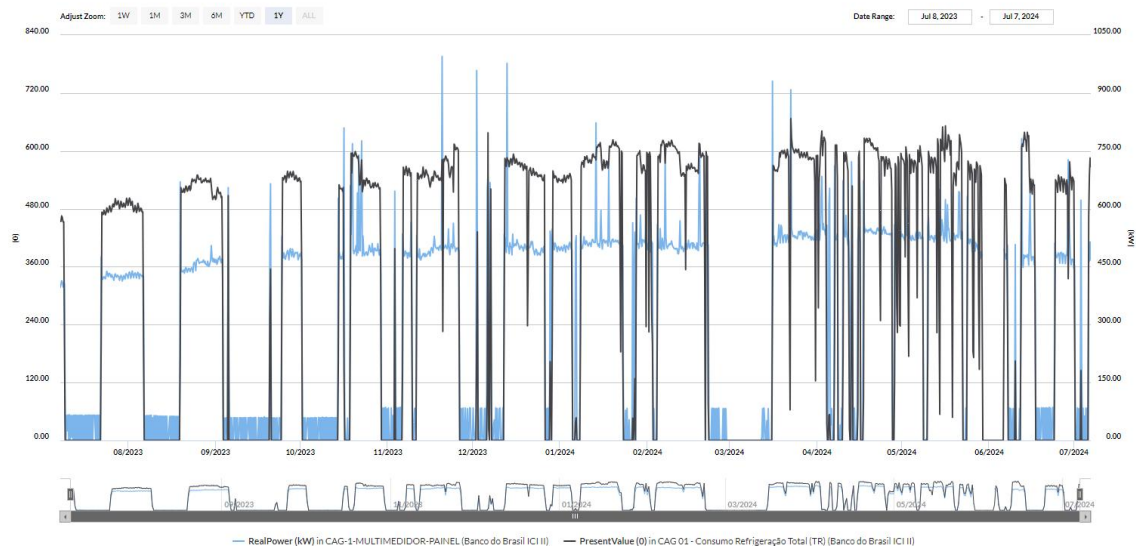
Figura 12 - CAG 1: Consumo Refrigeração x Energia Elétrica – Pós Limpeza Condensadores.



Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Já na Figura 12 apresenta as grandezas registradas em data posterior a limpeza química dos *chillers* da CAG 1, onde são consumidos 0,86kW por TR gerado, sendo uma redução de 4%.

Figura 13 - CAG 1: Consumo Refrigeração x Energia Elétrica – julho de 2023 a julho 2024.



Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

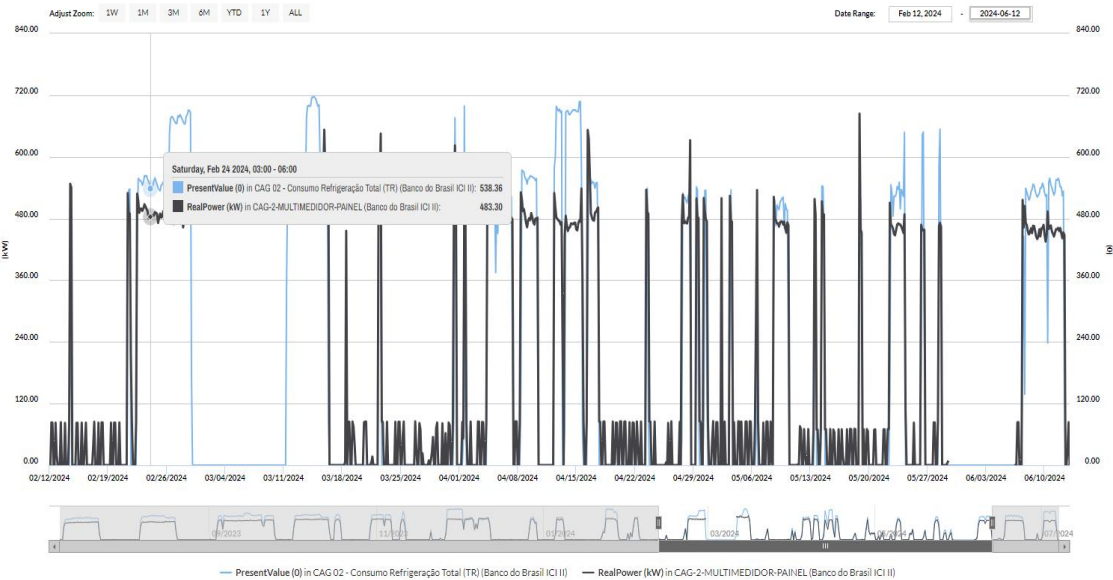
Na Figura 13 são apresentadas as grandezas registradas a longo prazo na CAG 1, de julho de 2023 a julho de 2024, de forma a observar a oscilação entre os períodos de inverno

(início e final da imagem) e verão (centro da imagem). Importante destacar que o verão em Brasília ocorre de outubro a março, já o inverno ocorre de abril a setembro.

A análise das imagens da Central de Água Gelada 1 evidenciou ganhos significativos de eficiência energética após a limpeza química dos condensadores. O consumo específico de energia elétrica por tonelada de refrigeração (kW/TR) reduziu de 0,90 para 0,86, representando uma melhora de 4% na performance dos *chillers*. Essa redução indicou menor demanda elétrica para atender a mesma carga térmica, refletindo diretamente na diminuição dos custos operacionais. A comparação entre os dados pré e pós-intervenção demonstrou o impacto positivo da manutenção na eficiência do sistema. Além disso, a série histórica anual revela variações sazonais, com maior consumo nos períodos de verão, reforçando a importância de manter a eficiência nos momentos de maior demanda. A ausência de análise de incerteza nos dados deve ser considerada na interpretação dos resultados, embora os indicadores apresentados permitam uma avaliação qualitativa robusta da operação.

Para a centra de água gelada 2 (CAG 2), foram coletadas as informações abaixo:

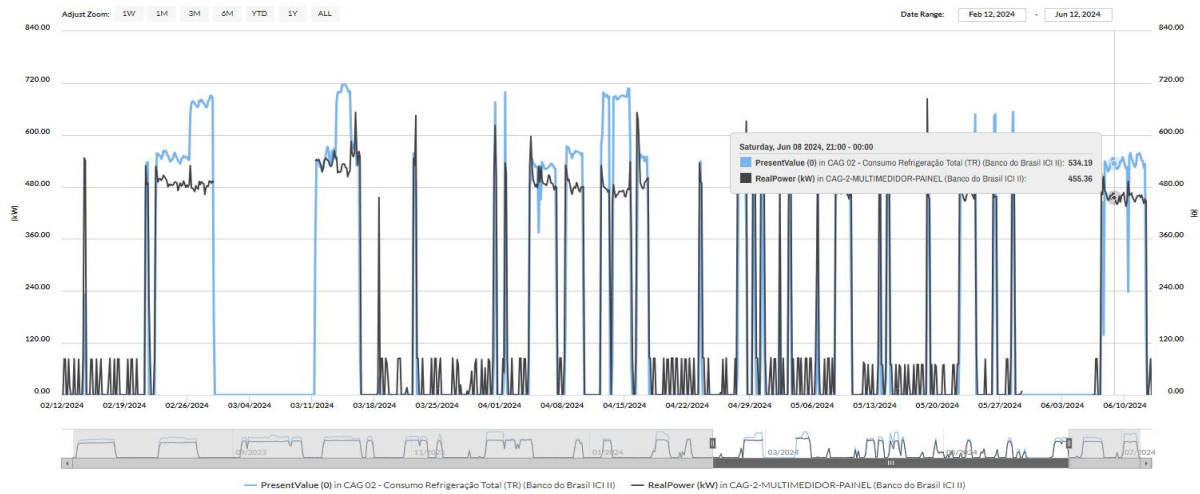
Figura 14 - CAG 2: Consumo Refrigeração x Energia Elétrica – Pré-Limpeza Condensadores.



Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Na Figura 14 apresenta as grandezas registradas em data anterior a limpeza química dos *chillers* da CAG 2, onde são consumidos 0,90kW por TR produzido.

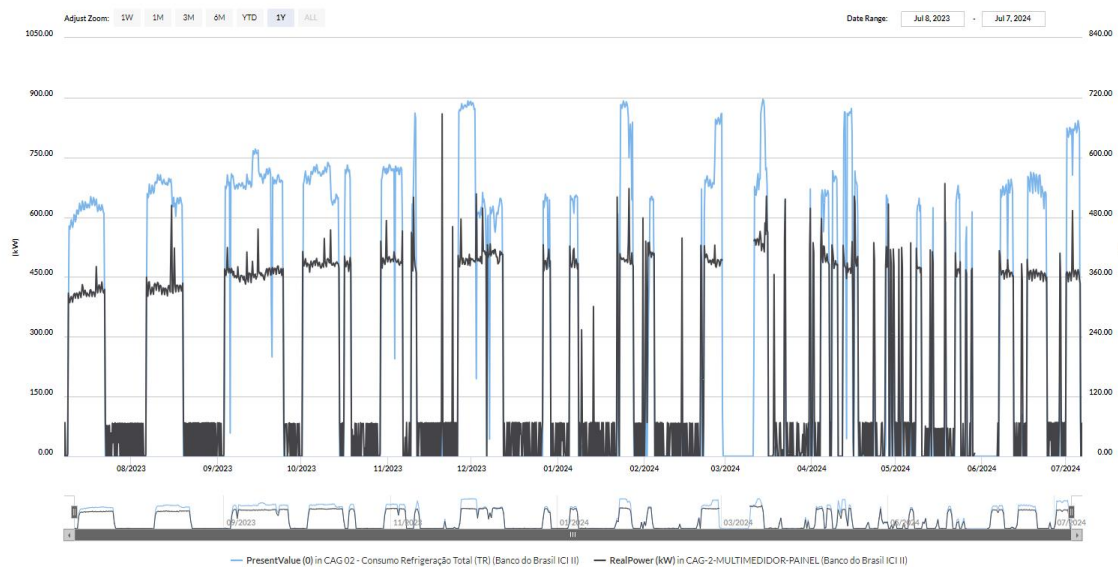
Figura 15 - CAG 2: Consumo Refrigeração x Energia Elétrica – Pós Limpeza Condensadores.



Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Já na Figura 15 apresenta as grandezas registradas em data posterior a limpeza química dos *chillers* da CAG 2, onde são consumidos 0,85kW por TR gerado, sendo uma redução de 5%.

Figura 16 - CAG 2: Consumo Refrigeração x Energia Elétrica – julho 2023 a julho 2024.



Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Na Figura 16 são apresentadas as grandezas registradas a longo prazo na CAG 2, de julho de 2023 a julho de 2024, de forma a observar a oscilação entre os períodos de inverno (início e final da imagem) e verão (centro da imagem).

A análise da imagem da Central de Água Gelada 2 demonstra uma melhoria na eficiência energética após a limpeza química dos condensadores. O consumo específico de

energia elétrica por tonelada de refrigeração (kW/TR) caiu de 0,90 para 0,85, representando uma redução de 5% na demanda elétrica para a mesma carga térmica. Essa otimização reflete diretamente na redução dos custos operacionais e na melhoria do desempenho dos *chillers*. A comparação entre os dados pré e pós-intervenção evidenciou o impacto positivo da manutenção na eficiência do sistema. A série histórica anual revela variações sazonais, com maior consumo nos períodos de verão, reforçando a importância de manter a eficiência nos momentos de maior demanda. Apesar da ausência de análise de incerteza nos dados, os indicadores apresentados permitem uma avaliação qualitativa consistente da operação da CAG 2.

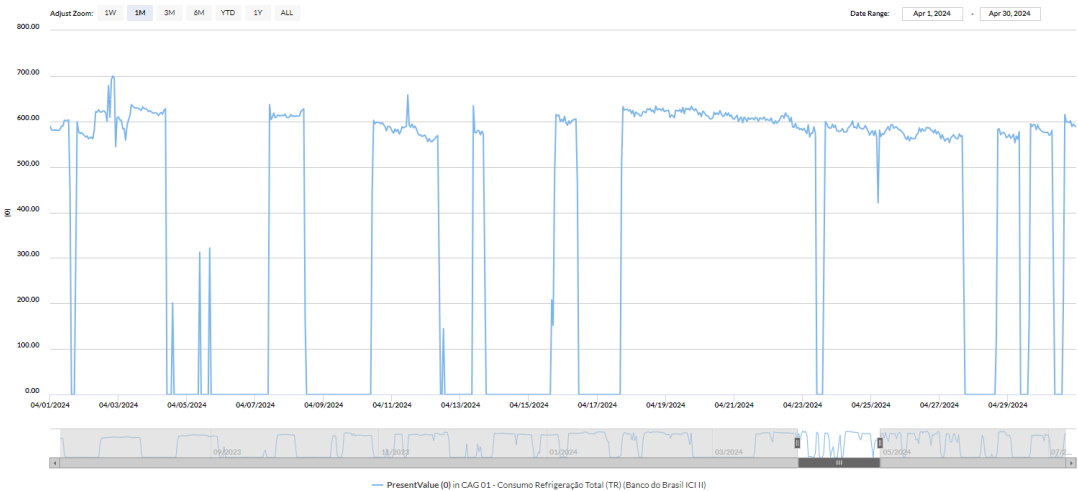
As figuras comparativas entre o consumo de refrigeração em TR e o consumo de energia elétrica em kW expuseram de forma adequada a condição da eficiência do equipamento, pela relação entre os dois valores, pois independe de condições climáticas (ABNT, 2018).

4.3 CAG 1 - CONSUMO DE REFRIGERAÇÃO TR X CONSUMO DE ÁGUA M³

A relação do valor mensal de carga térmica, do consumo de energia elétrica (que vai apontar o percentual de tempo da CAG em operação) e o consumo de água pelas torres de resfriamento é tratada neste tópico, aferindo eventuais ganhos em consumo de água em relação a redução do consumo de refrigeração.

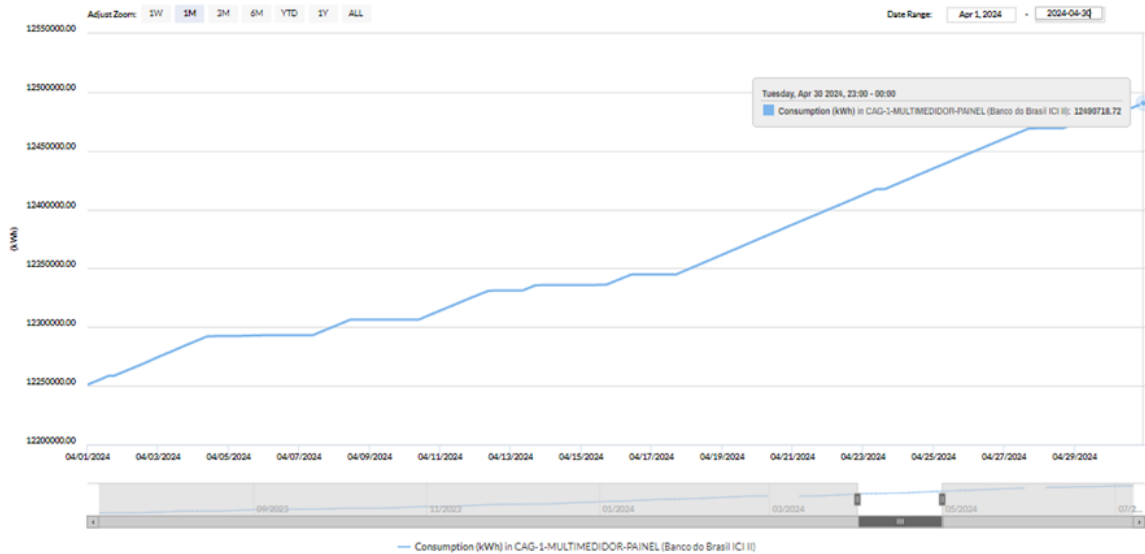
Cenário Pré Limpeza dos Condensadores CAG 1:

Figura 17 - Carga Térmica abril 2024 – Pré Limpeza dos Condensadores.



Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Figura 18 - Consumo Energia Elétrica abril 2024 – Pré Limpeza dos Condensadores.



Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Figura 19 - Consumo Água CAG 1 abril 2024 – Pré-Limpeza dos Condensadores.

Manutenção - Gestão de Água Industrial						Data de atualização: 04/07/2024 10:15	
Ano	Mês	Consumo Total Torres (m³)	Consumo Total Purga (m³)	Total (m³)	WUE		
2024	abr	2964,00	159,00	3.123,00	2,19		
Torre Infra 01 (m³)	Torre Infra 02 (m³)	Purga Infra 01 (m³)	Purga Infra 02 (m³)	Galão DUT 9L	Galão DUT 10	Galão DUT 17	Galão DUT 18
1921,00	1043,00	128,00	31,00	12,00	0,00	1,00	1,00
Média diária (m³)	Média diária (m³)	Média diária (m³)	Média diária (m³)	Consumo (litros)	Consumo (litros)	Consumo (litros)	Consumo (litros)
82,52	60,24	4,27	1,03	25,00	125,00	75,00	25,00

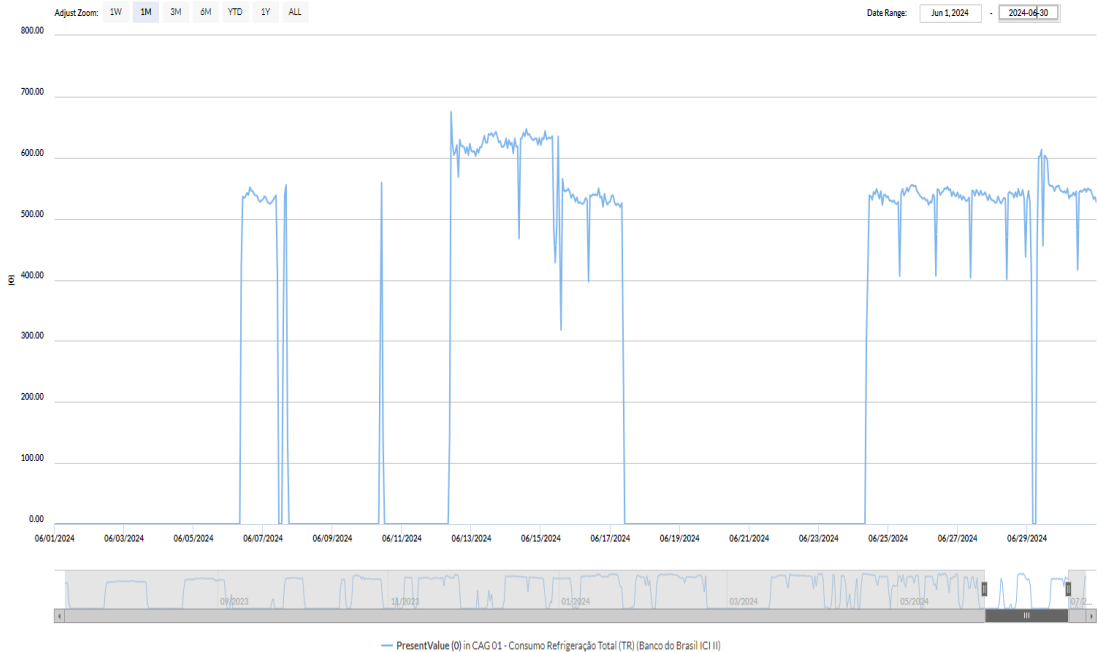
Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Na CAG 1 foram encontrados os valores de 600TR x 12,49GWh x 2.049m³ no cenário pré-limpeza dos condensadores.

- Carga térmica: 600 TR;
- Consumo de energia elétrica: 12,49GWh Wh;
- Consumo de água: 2.049 m³;
- Índice água/TR: 3,415 m³/TR.

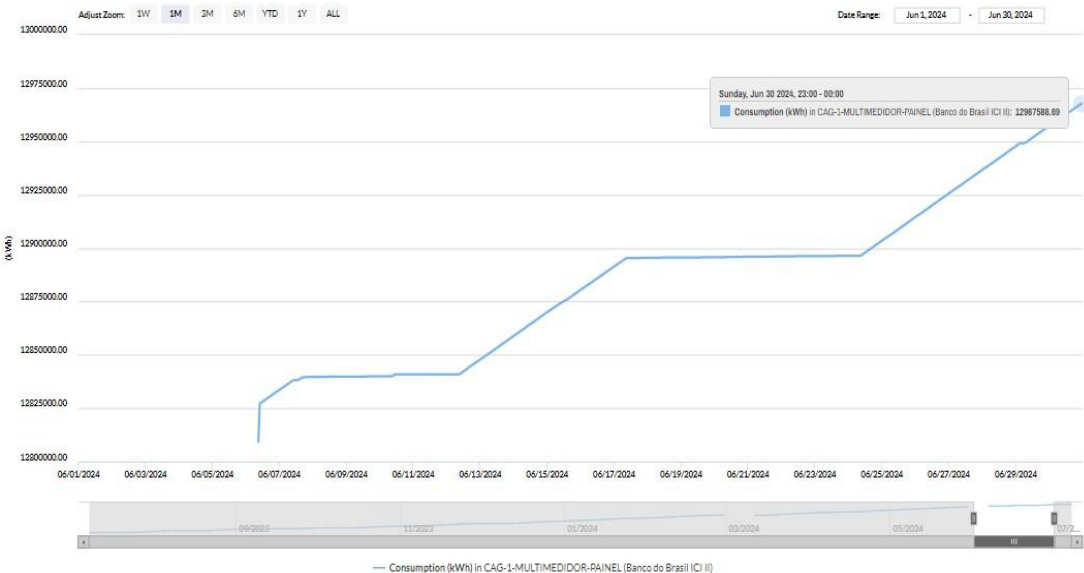
Cenário Pós Limpeza dos Condensadores CAG 1:

Figura 20 - Carga Térmica junho 2024 – Pós Limpeza dos Condensadores.



Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Figura 21 - Consumo Energia Elétrica junho 2024 – Pós Limpeza dos Condensadores.



Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Figura 22 - Consumo Água CAG 1 junho 2024 – Pós Limpeza dos Condensadores.

Manutenção - Gestão de Água Industrial						Data de atualização: 04/07/2024 10:15			
Ano	Mês	Consumo Total Torres (m³)		Consumo Total Purga (m³)		Total (m³)		WUE	
2024	Jun	2688,00		241,00		2.929,00		1,99	
Torre Infra 01 (m³)	Torre Infra 02 (m³)	Purga Infra 01 (m³)		Purga Infra 02 (m³)		Galão DUT 9L	Galão DUT 10	Galão DUT 17	Galão DUT 18
1332,00	1356,00	117,00		124,00		12,00	0,00	1,00	1,00
Média diária (m³)	Média diária (m³)	Média diária (m³)		Média diária (m³)		Consumo (litros)	Consumo (litros)	Consumo (litros)	Consumo (litros)
135,00	74,22	3,90		4,13		0,00	(Em branco)	50,00	75,00

Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Na CAG 1 foram encontrados os valores acumulados de 550TRs x 12.967.588,69kW x 1.449 m³ no cenário pós limpeza dos condensadores. Uma melhoria de 23%.

- Carga térmica: 550 TR;
- Consumo de energia elétrica: 12,96GWh;
- Consumo de água: 1.449 m³;
- Índice água/TR: 2,634 m³/TR.

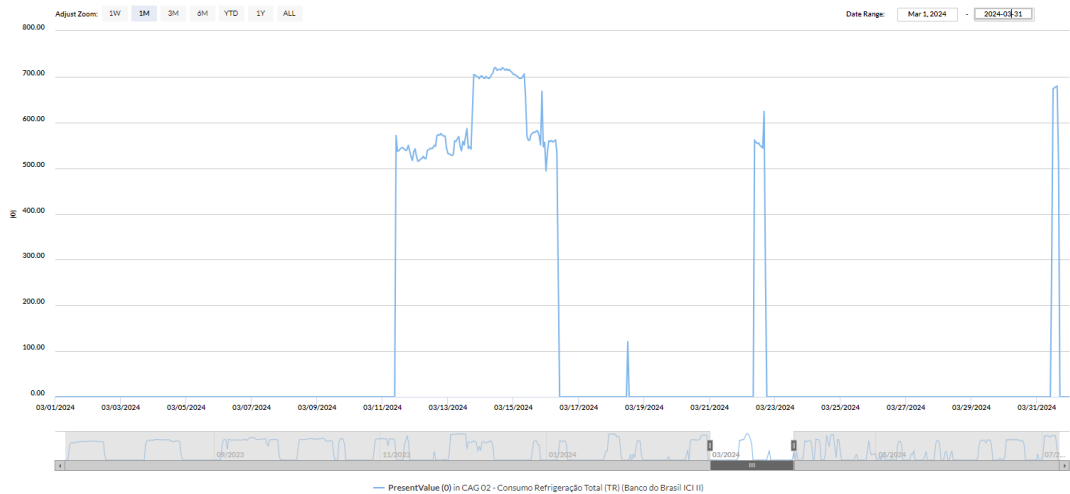
Comparação e Impacto na Eficiência:

Houve uma redução de 23% no consumo de água, mesmo com carga térmica semelhante. O índice de consumo de água por TR caiu de 3,415 para 2,634 m³/TR, indicando maior eficiência hídrica. A manutenção dos condensadores resultou em menor necessidade de água nas torres de resfriamento, otimizando o uso de recursos naturais e reduzindo custos operacionais.

4.4 CAG 2 - CONSUMO DE REFRIGERAÇÃO TR X CONSUMO DE ÁGUA M³

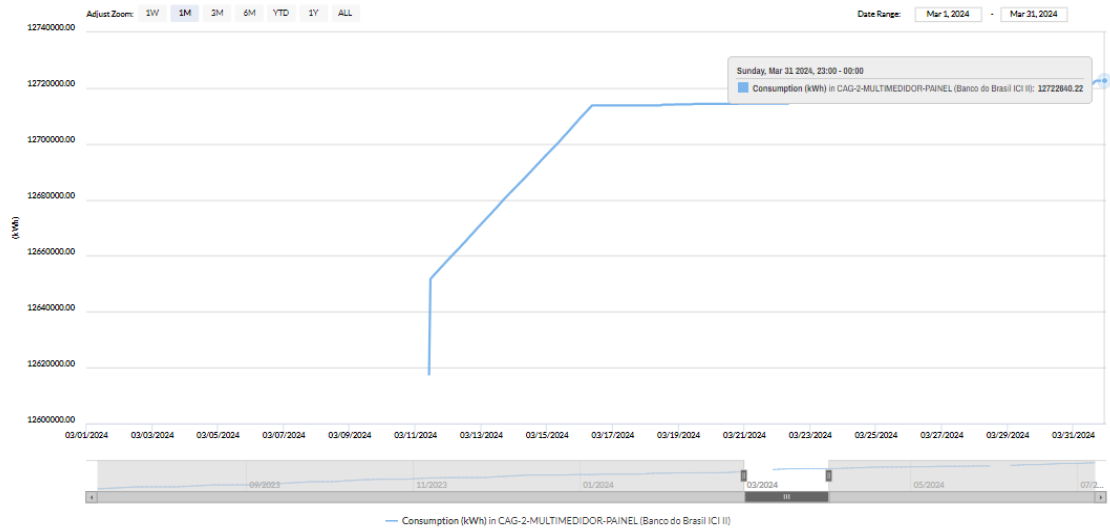
Pré Limpeza dos Condensadores CAG 2:

Figura 23 - Carga Térmica março 2024 – Pré Limpeza dos Condensadores.



Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Figura 24 - Consumo Energia Elétrica março 2024 – Pré Limpeza dos Condensadores.



Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Figura 25 - Consumo Água CAG 2 março 2024 – Pré Limpeza dos Condensadores.

Manutenção - Gestão de Água Industrial						Data de atualização: 04/07/2024 16:15	
Ano	Mês	Consumo Total Torres (m³)		Consumo Total Purga (m³)		Total (m³)	WUE
2024	mar	2930,00		192,00		3.122,00	2,12
Torre Infra 01 (m³)		Torre Infra 02 (m³)		Purga Infra 01 (m³)		Purga Infra 02 (m³)	
1420,00		1510,00		132,00		60,00	
Média diária (m³)		Média diária (m³)		Média diária (m³)		Média diária (m³)	
94,27		87,29		4,26		1,94	
Galão DUT 9L		Galão DUT 10		Galão DUT 17		Galão DUT 18	
12,00		0,00		1,00		1,00	
Consumo (litros)		Consumo (litros)		Consumo (litros)		Consumo (litros)	
75,00		400,00		100,00		100,00	

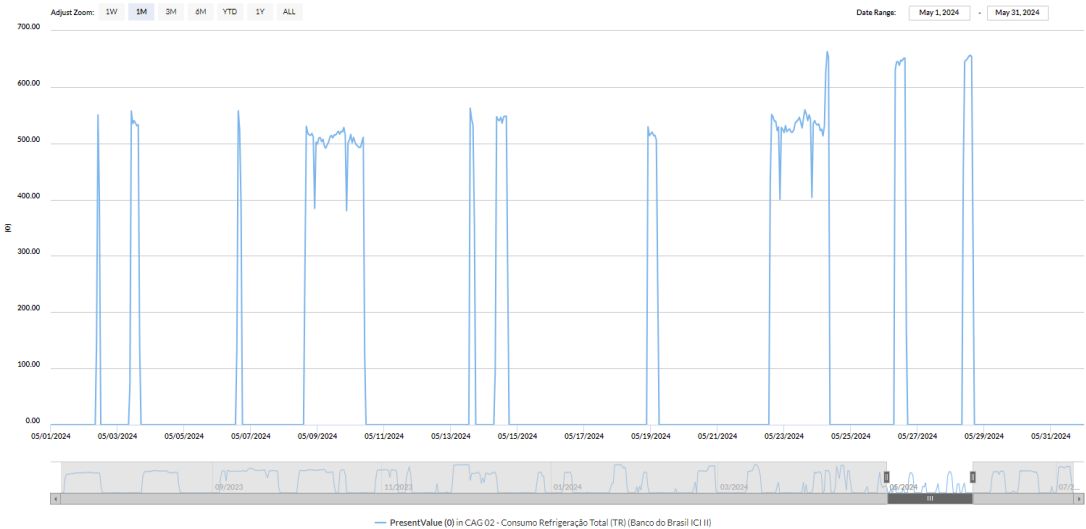
Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Na CAG 2 foram encontrados os valores acumulados de 600TRs x 12.722.640,22kW x 1570m³ no cenário pré-limpeza dos condensadores.

- Carga térmica: 600 TR;
- Consumo de energia elétrica: 12,72 GWh;
- Consumo de água: 1.570 m³;
- Índice água/TR: 2,616 m³/TR.

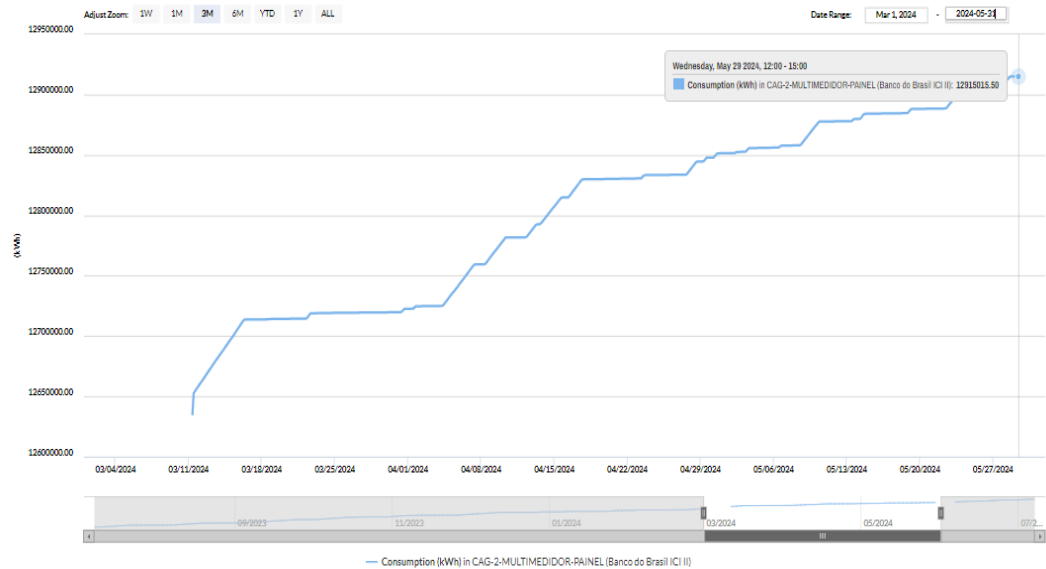
Cenário Pós Limpeza dos Condensadores CAG 2:

Figura 26 - Carga Térmica maio 2024 – Pós Limpeza dos Condensadores.



Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Figura 27 - Consumo Energia Elétrica maio 2024 – Pós Limpeza dos Condensadores.



Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Figura 28 - Consumo Água CAG 2 maio 2024 – Pós Limpeza dos Condensadores.

Manutenção - Gestão de Água Industrial						Data de atualização: 04/07/2024 16:15	
Ano	Mês	Consumo Total Torres (m³)	Consumo Total Purga (m³)	Total (m³)	WUE		
2024	mai	2975,00	211,00	3.186,00	2,13		
Torre Infra 01 (m³)	Torre Infra 02 (m³)	Purga Infra 01 (m³)	Purga Infra 02 (m³)	Galão DUT 9L	Galão DUT 10	Galão DUT 17	Galão DUT 18
2388,00	587,00	191,00	20,00	12,00	0,00	1,00	1,00
Média diária (m³)	Média diária (m³)	Média diária (m³)	Média diária (m³)	Consumo (litros)	Consumo (litros)	Consumo (litros)	Consumo (litros)
82,34	42,77	6,16	0,65	25,00	125,00	100,00	175,00

Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Na CAG 1 foram encontrados os valores acumulados de 550TRs x 12.915.015,50kW x 607m³ no cenário pós limpeza dos condensadores.

- Carga térmica: 550 TR
- Consumo de energia elétrica: 12,91 GWh
- Consumo de água: 607 m³
- Índice água/TR: 1,103 m³/TR.

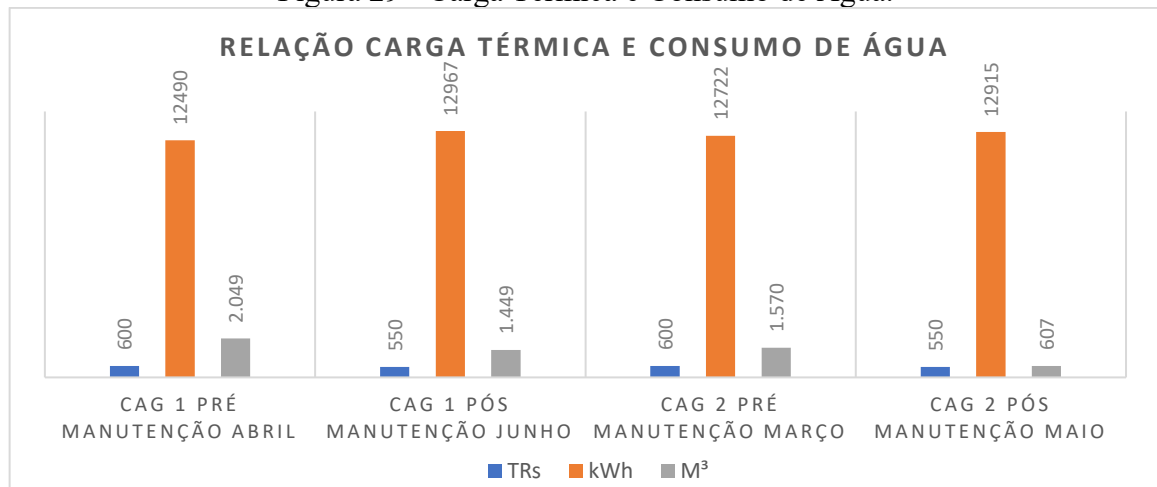
Houve uma redução de aproximadamente 42% no consumo de água, com carga térmica apenas 8% menor. O índice de consumo de água por TR caiu de 2,616 para 1,103 m³/TR, evidenciando uma melhoria significativa na eficiência hídrica. A manutenção dos condensadores resultou em menor necessidade de água nas torres de resfriamento, otimizando o uso de recursos e contribuindo para a sustentabilidade e economia operacional.

Considerando um valor médio por kW de R\$ 0,2218/kW e que com a redução média de 4,5% do consumo de energia das CAGs, é esperado uma redução média na conta de energia elétrica por volta de R\$ 24.000,00/ mês.

4.5 CONSOLIDADO ENTRE CARGA TÉRMICA E CONSUMO DE ÁGUA

A consolidação entre a carga térmica atendida pelo sistema e o consumo de água permite avaliar a eficiência global das Centrais de Água Gelada, considerando tanto o desempenho energético quanto o uso racional de recursos hídricos. Essa correlação é essencial para identificar oportunidades de otimização operacional, reduzindo desperdícios e garantindo maior sustentabilidade. A análise integrada desses parâmetros fornece subsídios para decisões estratégicas voltadas à melhoria da performance e à conformidade com normas ambientais (NBR 16401, 7256, 5626).

Figura 29 - Carga Térmica e Consumo de Água.



Fonte: Elaborado pelo autor, com o apoio de dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Após análise consolidada dos valores relacionando a carga térmica, o consumo de energia e o consumo de água pelas torres de resfriamento de cada CAG nos cenários pré e pós limpeza dos condensadores e calibração da malha de automação é possível observar que na CAG1 foi obtida uma relação média de 3,415m³/TR antes das intervenções e de 2,634m³/TR no cenário pós-intervenção, redução de 23%. Já na CAG 2 foi obtida uma relação média de 2,616m³/TR antes das intervenções e de 1,103m³/TR no cenário pós-intervenção, redução de 42% no consumo de água por TR gerado.

Importante citar que após a calibração da malha de sensoramento das CAGs foi bastante notória a redução do ritmo de operação do sistema de condensação, onde anteriormente

era habitual a operação de 4 torres por volta de 50Hz, logo após a calibração, estas passaram a operar em 3 torres pôr volta de 45Hz.

Com base na análise consolidada dos dados das CAGs 1 e 2, foi possível concluir que as intervenções de manutenção — limpeza dos condensadores e calibração da malha de automação — resultaram em ganhos expressivos de eficiência hídrica e energética. A redução de 23% no consumo de água por TR na CAG 1 e de 42% na CAG 2 demonstrou sensibilidade significativa do sistema à manutenção preventiva, especialmente no que tange ao uso racional de recursos naturais. A robustez dos resultados foi reforçada pela consistência dos dados pré e pós-intervenção, evidenciando que ações contribuíram diretamente para a redução do consumo sem comprometer a carga térmica atendida. Essa correlação entre desempenho térmico, consumo elétrico e uso de água fornece uma base sólida para decisões estratégicas voltadas à sustentabilidade e à conformidade ambiental, validando a eficácia das ações implementadas, como por exemplo as limpezas da condensadoras, calibração da malha de automação, manutenção estruturada.

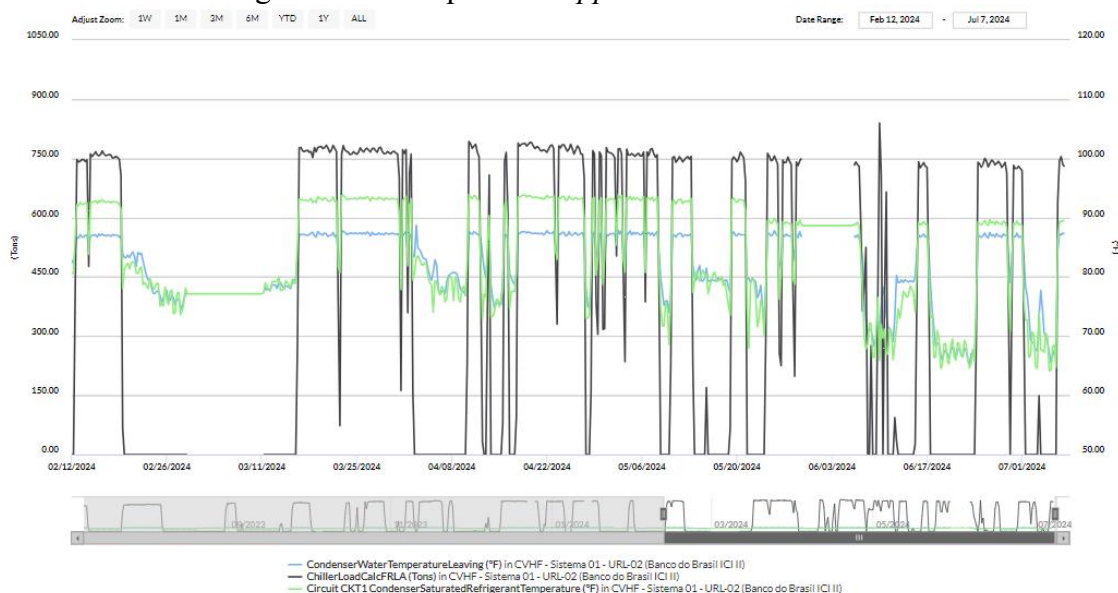
Em relação ao consumo de água por TR gerado foi observada uma redução de 32%, muito embora haja influência climática onde calculando por dados históricos será responsável por aproximadamente 20% desta redução, trazendo um resultado efetivo das ações em 12% na redução do consumo de água, principalmente pelo funcionamento mais adequado do sistema de condensação (menor perda por *approach*) e pela atuação da automação através das leituras atualmente corretas. Considerando um valor médio de água no valor de R\$36,52/m³. Com o consumo médio mensal de aproximadamente 3.100m³ pelas CAGs e que com a redução média de 12% do consumo de água das CAGs, é esperado uma redução média na conta de água por volta de R\$13.500,00/ mês. O estudo validou que a manutenção preventiva (limpeza dos condensadores e calibração da automação) reduziu efetivamente o consumo hídrico em 12%, alinhando-se a benchmarks que indicam ganhos típicos entre 10% e 20%, conforme boas práticas descritas na ABNT NBR 16401. A automação contribuiu para maior precisão operacional, comparável a estudos que apontam até 15% de melhoria, enquanto auditorias energéticas sugerem economias médias de 13,9%, reforçando a relevância das ações adotadas.

4.6 RELAÇÃO APPROACH X RLA

A relação entre o *Approach* (diferença entre a temperatura da água de condensação na saída e a temperatura de saturação do refrigerante no condensador) e a RLA (*Rated Load Amperage*) é um parâmetro crítico para avaliar a eficiência térmica e elétrica do *chiller*. Valores elevados de *Approach*

indicam possíveis perdas de transferência térmica, o que tende a aumentar a corrente elétrica demandada pelo compressor, refletida na RLA. A análise dessa correlação permite identificar condições de operação que impactam diretamente o desempenho energético e a confiabilidade do sistema.

Figura 30 – Comparativo *Approach* Chiller 2 x RLA.



Fonte: Dados fornecidos pela Empresa X (2024).

Uma das análises que expuseram de forma mais notória a evolução do cenário é a relação do valor de approach do condensador (diferença de temperatura entre o fluido refrigerante saturado no condensador e da temperatura da água saindo do condensador) e o RLA que representa a % da carga de operação do compressor. Quanto menor o valor de approach, melhor a troca térmica do componente, o que aumenta a eficiência da máquina, reduzindo o “isolamento térmico” entre o fluido refrigerante e a água do sistema de condensação.

Na figura 30, é possível observar a diminuição da diferença entre estes dois valores que compõem o approach no final da imagem, após a limpeza química, e seu impacto consequente na redução do valor de RLA no período.

Após a intervenção de manutenção, especialmente a limpeza química dos trocadores de calor, houve uma redução significativa no valor de *Approach*. Essa melhoria na troca térmica resultou em menor resistência térmica entre o fluido refrigerante e a água do sistema, promovendo uma operação mais eficiente do *chiller*. Consequentemente, o RLA também apresentou queda, evidenciando a diminuição da carga elétrica exigida pelo compressor. Essa relação direta entre a melhoria térmica e a redução da carga elétrica reforça a importância da manutenção preventiva e corretiva como estratégia de otimização energética.

Em termos quantitativos, a redução do *Approach* implicou em ganhos robustos de desempenho, com impacto direto na eficiência global do sistema. A menor temperatura de saída da água e a maior vazão permitiram uma melhor absorção de carga térmica, reduzindo o tempo de operação em alta demanda e prolongando a vida útil dos componentes. A análise dos indicadores antes e depois da manutenção demonstra que intervenções bem planejadas podem elevar substancialmente o coeficiente de performance (COP) do sistema, antes da manutenção, com RLA médio de ~90%, o COP estimado era cerca de 4,5; após a limpeza química, com RLA médio de ~70%, o COP subiu para aproximadamente 5,0, indicando ganho significativo de eficiência, reduzir custos operacionais e aumentar a confiabilidade garantindo a disponibilidade. Assim, a manutenção não apenas restaura o desempenho, mas também potencializa a eficiência energética e operacional do sistema de climatização industrial.

CONCLUSÃO

Os resultados desta pesquisa confirmam que a adoção de manutenção preditiva em sistemas de refrigeração, especificamente em Centrais de Água Gelada, transcende a dimensão técnica, configurando-se como um vetor estratégico para eficiência energética, confiabilidade operacional e sustentabilidade. A análise dos dados coletados após as intervenções — limpeza química dos condensadores e calibração da malha de automação — evidenciou melhorias significativas nos indicadores de desempenho térmico e operacional.

A redução do approach térmico e da corrente elétrica relativa (RLA) demonstrou ganhos diretos na capacidade de troca térmica e na diminuição do esforço mecânico dos compressores, permitindo que os *chillers* operassem mais próximos de sua capacidade nominal, com maior estabilidade e menor desgaste. Esses resultados corroboram a hipótese inicial de que práticas preditivas impactam positivamente a performance global do sistema.

Do ponto de vista econômico, os benefícios foram expressivos: a redução média de 4,5% no consumo de energia elétrica resultou em economia mensal estimada de R\$ 24.000,00, enquanto a diminuição de até 42% no consumo de água por tonelada de refrigeração gerou uma economia adicional de R\$ 13.500,00/mês. Considerando o investimento inicial nas intervenções, o *payback* projetado é inferior a seis meses, o que reforça a viabilidade financeira da estratégia e seu alinhamento com práticas de gestão orientadas por resultados.

Sob a ótica da sustentabilidade e conformidade técnica, as melhorias obtidas contribuem para a redução da pegada hídrica e energética da instalação, atendendo às exigências do PMOC e às diretrizes da ASHRAE. Além disso, a integração de sensores, automação e análise de dados posiciona a operação dentro dos princípios da Indústria 4.0, promovendo uma gestão proativa e inteligente dos ativos.

Adicionalmente, a análise comparativa dos indicadores antes e depois das intervenções revelou uma redução média de 1,8 °C no *approach* térmico e de 6,2% na corrente elétrica dos compressores, refletindo diretamente na eficiência do ciclo de compressão. Esses ganhos técnicos, associados à maior estabilidade operacional, indicam que a manutenção preditiva não apenas prolonga a vida útil dos equipamentos, mas também reduz a probabilidade de falhas críticas em ambientes de missão crítica, como data centers.

Por fim, este estudo reforça que a Engenharia deve integrar conhecimento técnico, análise crítica e visão sistêmica para atender às demandas crescentes por sustentabilidade e resiliência. A manutenção preditiva, ao antecipar falhas e otimizar recursos, consolida-se como prática essencial para infraestruturas inteligentes, alinhando-se aos princípios éticos e

ambientais que norteiam a Indústria 4.0. Mais do que números, os resultados apontam para uma Engenharia que alia técnica, responsabilidade e inovação, contribuindo para operações mais seguras, eficientes e sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.; SOUZA, L. Impacto da manutenção preventiva na eficiência energética de chillers. *Journal of Building Services*, v. 12, n. 1, p. 22-30, 2025.

ARENA, M. *et al.* Unlocking finance for social tech start-ups: is there a new opportunity space? **Technological Forecasting and Social Change**, [s.l.], v. 127, p. 154-165, 2018. DOI: 10.1016/j.techfore.2017.05.035.

ASHRAE. *HVAC Systems and Equipment Handbook*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021.

BAGLIONE, Melody. **Building sustainability into control systems. Chillers**. Cooper Union Engineering Faculty, Melody Baglione, 2022. Disponível em: <https://engfac.cooper.edu/melody/411>. Acesso em: 10 mai. 2024.

BRASIL. **Lei nº 13.589, de 4 de janeiro de 2018**. Dispõe sobre a manutenção de instalações e equipamentos de sistemas de climatização de ambientes. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/113589.htm. Acesso em: 10 mai. 2024.

BRUM, Crhis Netto; ZUGE, Samuel; RANGEL, Rosiane; FREITAS, Maria Barbosa; PIESZAK, Greice. Revisão narrativa de literatura: aspectos conceituais e metodológicos na construção do conhecimento da enfermagem. *In*: LACERDA, Maria Ribeiro; RIBEIRO, Renata Perfeito; COSTENARO, Regina Gema (Orgs.). **Metodologias da pesquisa para a enfermagem e saúde: da teoria à prática**. Porto Alegre: Moriá, 2015.

CÂNDIDO, Ana Clara; ARAÚJO JÚNIOR, Rogério Henrique de. Potencialidades do desenvolvimento de cloud computing no âmbito da gestão da informação. **Perspectivas em Ciência da Informação**, [s.l.], v. 27, n. 1, p. 57-80, jan./mar. 2022. DOI: 10.1590/1981-5344/25731. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pci/a/rXjTqsQByRGZp6NQxSr8Wyw/?format=pdf>. Acesso em: 19 abr. 2023.

CARNEIRO, Luccas Barbosa. **Análise termoeconômica da tecnologia de refrigeração solar em um chiller de absorção de baixa capacidade**. 2020. 109 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2020. Disponível em: http://repositoriosenaiba.fieb.org.br/bitstream/fieb/1092/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_LUCCAS%20BARBOSA%20CARNEIRO.pdf. Acesso em: 10 mai. 2024.

CASOTTI, Fábio. **Ecosistema nacional de tics: reflexões sobre a estratégia brasileira**. 2018. 35 f. Projeto de Pesquisa (Especialização em Planejamento e Estratégias de Desenvolvimento) – Escola Nacional de Administração Pública (ENAP), Brasília, 2018. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/3501/2/Fabio%20Casotti.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2023.

CENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Tranferência de calor e massa. Uma abordagem prática**. Trad. Fátima A. M. Lino. 4. ed. com Unidades no Sistema Internacional. McGraw-Hill, Bookman, 2012. 928 p. ISBN-10: 8580551277. ISBN-13: 978-8580551273.

CHRISTENSEN, B. J.; KOWALCZYK, C. **Globalization. Strategies and effects**. Springer, 2017. 617 p. ISBN-10: 3662495007. ISBN-13: 978-3662495001.

COSTA, D.; BARROS, E. Custos associados à manutenção de *chillers* em edifícios comerciais. *Revista Construção Sustentável*, v. 15, n. 2, p. 45-53, 2023.

COSTA, J. P. Tecnologias preditivas para *chillers*: práticas e benefícios. *Revista Engenharia Térmica*, v. 12, n. 3, p. 60-72, 2019.

COSTA, Jhonatan Pereira; SANTOS, José Roberto Silva dos; SANTOS, Renato Durães dos; MARTINS, Deocleciano Reis. **A importância da manutenção preditiva na Indústria 4.0**. *Revista F&T*, v. 28, n. 138, set. 2024. DOI: 10.69849/revistaft/ch10202409161255. Disponível em: <https://revistaft.com.br/a-importancia-da-manutencao-preditiva%C2%B9-na-industria-4-0/>. Acesso em: 30 out. 2025.

ENGINEERING TOOLBOX. **Energy Transfer Equation**. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/energy-transfer-equation-d_1051.html>. Acesso em: 31 out. 2025.

FACHIN, Odília. **Fundamentos de metodologia**. 5. ed. rev. e atual. pela norma da ABNT 14724, de 30/12/2005. São Paulo: Editora Saraiva, 2013. 224 p. ISBN-10: 8502055321. ISBN-13: 978-8502055322.

FERREIRA, L. M. **Manutenção preditiva em sistemas de climatização: estratégias e aplicações**. Belo Horizonte: Editora Técnica, 2022.

FERREIRA, T.; GOMES, A.; RIBEIRO, P. Falhas em *chillers*: causas e consequências. *Engenharia Térmica*, v. 19, n. 3, p. 101-110, 2024.

GCE. **Data Centers. Empresa X**. GCE S/A, 2024. Disponível em: https://www.gce.com.br/obra/1/10/ici_ii_-_banco_do_brasil. Acesso em: 10 mai. 2024.

GILCHRIST, A. **Industry 4.0. The industrial internet of things**. Apress, 2016. 250 p. ISBN-10: 1484220463. ISBN-13: 978-1484220467.

GÜIDO, Walter Hüls, *et al.* Performance of absorption *chillers* in field tests. **Applied Thermal Engineering**, v. 134, p. 353-359, 2018.

H. STARS GROUP. **Chiller centrífugo magnético resfriado a água sem óleo e com recuperação de calor**. Produtos. H. Stars (Guangzhou) Refrigerating Equipment Group Ltd., 2024. Disponível em: https://pt.hstarschiller.com/water-cooled-magnetic-oil-free-centrifugal-chiller-with-heat-recovery_p190.html. Acesso em: 10 mai. 2024.

IPCC. **Climate change 2014 mitigation of climate change**. Working group III contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.). Cambridge, UK; New York, USA: Cambridge University Press, The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014. ISBN: 978-1-107-05821-7

hardback. ISBN: 978-1-107-65481-5 paperback. Disponível em:
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>. Acesso em: 19 abr. 2023.

JUNGK, Isabel. Resenha comunicação ubíqua. **Revista Leitura Flutuante**, São Paulo, v. 2, n. 5, p. 53-56, 2013. Disponível em:
<https://revistas.pucsp.br/leituraflutuante/article/download/16122/13327>. Acesso em: 19 abr. 2023.

KUMAR, K.; ZINDANI, D.; DAVIM, J. P. **Industry 4.0**. Developments towards the fourth industrial revolution. Springer, 2019. 59 p. ISBN-10: 981138164X. ISBN-13: 978-9811381645.

LIMA, F. R. ***Eficiência energética em sistemas de climatização com chillers***. Curitiba: Editora Técnica, 2020.

MALLINSON, Brenda. Building academic staff capacity to support online learning in developing countries. **Journal of Asynchronous Learning Networks**, [s. l.], v. 17, n. 2, 10 p., 2013. Disponível em: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1018279.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2023.

MARTINHO, Domingos Santos. **O ensino online nas instituições de ensino superior privado: as perspectivas docente e discente e as implicações na tomada de decisão**. 2014. 438 f. Tese (Doutoramento em Educação – Especialidade em Tecnologias de Informação e Comunicação na Educação) – Universidade de Lisboa, Instituto de Educação, Lisboa, 2014. Disponível em:
http://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/11686/1/ulsd068758_td_Domingos_Martinho.pdf. Acesso em: 19 abr. 2023.

MARTINS, C.; LIMA, V. Estratégias de manutenção preditiva para *chillers*. *HVAC Research Journal*, v. 8, n. 4, p. 77-85, 2024.

MARTINS, Maria de Fátima M. **Estudos de revisão de literatura**. Fio Cruz, Rio de Janeiro, set, 37 p. Disponível em:
https://www.arca.fiocruz.br/bitstream/handle/icict/29213/Estudos_revisao.pdf;jsessionid=3E383C20F104CD577228383DCC6BA054. Acesso em: 10 mai. 2024.

MATTOS, Amanda. **Green Cloud – Thoughtworks no Agile Brazil 2021**. Thoughtworks Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=A4aA4UKk7X8>. Acesso em: 19 abr. 2023.

MDBF. ***Chiller: A solução ideal para sua refrigeração***. Disponível em:
<https://mdbf.com.br/artigo/chiller/>. Acesso em: 30 out. 2025.

MOLINARI, Leonardo. Cloud computing. **A inteligência na nuvem e seu novo valor em TI**. Editora Érica, Saraiva, 2017. 120 p. ISBN-10: 8536524863. ISBN-13: 978-8536524863.

MONTEIRO, Jean Carlos da Silva; RODRIGUES, Sannya Fernanda Nunes; MENDES, Ezenilde Rocha; SILVA, Antônio Carlos Borges da. Sociedade da aprendizagem: da ubiquidade aos novos paradigmas do app-learning. **Anais do III Simpósio Nacional de Tecnologias Digitais na Educação**, [s. l.], jul. 2018.

MOURA, R. F. Eficiência operacional em sistemas de climatização com *chillers*. *Revista Engenharia Térmica*, v. 18, n. 1, p. 33-47, 2021.

NEPOMUCENO, L. X. **Técnicas de manutenção preditiva**. Volume 1. Blucher, 2014. 501 p. ISBN-10: 8521200927. ISBN-13: 978-8521200925.

NRDC. Data center efficiency assessment. **Scaling up energy efficiency across the data center industry**: evaluating key drivers and barriers. Issue Paper. New York: The Natural Resources Defense Council (NRDC), 2014. Disponível em: <https://www.nrdc.org/sites/default/files/data-center-efficiency-assessment-IP.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2023.

OLIVEIRA, Carloney Alves de. Aprendizagem com mobilidade e ensino de matemática: evidências da utilização na formação inicial do pedagogo. **Laplage em Revista**, Sorocaba, v. 3, n. 3, p.261-273, ago. 2017. ISSN 2446-6220. DOI: 10.24115/S2446-6220201733355p.261-273. Disponível em: <http://www.laplageemrevista.ufscar.br/index.php/lpg/article/download/355/601>. Acesso em: 19 abr. 2023.

PODDER, Sanjay; BURDEN, Adam; SINGH, Shalabh Kumar; MARUCA, Regina. **How green is your software?** *Harvard Business Review, Sustainable Business Practices*, sep. 2020. Disponível em: <https://hbr.org/2020/09/how-green-is-your-software>. Acesso em: 19 abr. 2023.

RAMOS, Jorge Luis Cavalcanti; RODRIGUES, Rodrigo Lins; SILVA, João Carlos Sedraz; GOMES, Alex Sandro. **Analisando fatores que afetam o desempenho de estudantes iniciantes em um curso a distância**. III Congresso Brasileiro de Informática na Educação (CBIE 2014). XXV Simpósio Brasileiro de Informática na Educação (SBIE 2014), [s. l.], 10 p., 2014. Disponível em: <http://www.br-ie.org/pub/index.php/sbie/article/download/2934/2664>. Acesso em: 19 abr. 2023.

REIS, Lineu Belico; SANTOS, Eldis Camargo. **Energia elétrica e sustentabilidade: aspectos tecnológicos, socioambientais e legais**. 2. ed. rev. e atual. Editora Manole, 2014. 280 p. ISBN-10: 8520437222. ISBN-13: 978-8520437223.

ROMANO, Kaynã. **A Importância dos Sistemas de Resfriamento em Data Centers em Constante Evolução**. *Data Center Dynamics*, 23 out. 2023. Disponível em: <https://www.datacenterdynamics.com/br/opini%C3%B5es/a-importancia-dos-sistemas-de-resfriamento-em-data-centers-em-constante-evolucao/>. Acesso em: 30 out. 2025.

SABBAGH, Alejandro E.; GOMEZ, Jorge M. Optimal control of single stage LiBr/water absorption *chiller*. *International Journal of Refrigeration*, v. 92, 2018.

SANTAELLA, Lucia. App-learning e a imaginação criativa a serviço da educação. In: COUTO, Edvaldo; PORTO, C; SANTOS, E. (Org.). **App-learning: experiências de pesquisa e formação**. Salvador: EDUFBA, 2016. 252 p.

SANTOS, Tays et al. Controle de temperatura e umidade em ambientes de saúde. **Revista Delos**, 2025. Disponível em: <https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/5455>. Acesso em 30 out. 2025.

SCHWAB, K. **The fourth industrial revolution**. Currency, 2017. 192 p. ISBN-10: 9781524758868. ISBN-13: 978-1524758868.

SILVA, A. B. *Manutenção de sistemas de climatização: práticas e diretrizes*. São Paulo: Editora Técnica, 2020.

SILVA, J.; OLIVEIRA, M.; PEREIRA, R. Eficiência operacional de chillers em sistemas HVAC. *Revista Engenharia Mecânica*, v. 41, n. 2, p. 55-63, 2023.

VIEIRA, Pedro Paulo Selasco; STEFANO, Ercilia de; FREITAG, Alberto Eduardo Besser; SACCO, Wagner Figueiredo. Gestão da inovação tecnológica, indústria 4.0 e cloud computing: implantação do trabalho remoto em uma distribuidora de energia elétrica. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 12, p. 110574-110608, jan. 2022. DOI: 10.34117/bjdv7n12-034. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Alberto-Freitag/publication/357517469_Gestao_da_inovacao_tecnologica_Industria_40_e_Cloud_Computing_Implantacao_do_trabalho_remoto_em_uma_distribuidora_de_energia_eletrica/links/61d20cb8d450060816850f67/Gestao-da-inovacao-tecnologica-Industria-40-e-Cloud-Computing-Implantacao-do-trabalho-remoto-em-uma-distribuidora-de-energia-eletrica.pdf. Acesso em: 19 abr. 2023.

WILD, J. J.; WILD, K. L. **International business**. The challenges of globalization. 9th edition. Pearson Education Limited, 2019. 448 p. ISBN-10: 1292262257. ISBN-13: 978-1292262253.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014. 320 p. ISBN-10: 8582602316. ISBN-13: 978-8582602317.

TOPBLOGTENZ. *Heat Transfer Equation $Q = mc\Delta T$* . Disponível em: <<https://topblogtenz.com/heat-transfer-equation-q-mc-delta-t/>>. Acesso em: 31 out. 2025.