AR CONDICIONADO

MANUAL SOBRE SISTEMAS DE ÁGUA GELADA

VOLUME II

APLICAÇÕES – PROJETO, INSTALAÇÃO E OPERAÇÃO

PROGRAMA BRASILEIRO DE ELIMINAÇÃO DOS HCFCs

Projeto para o Gerenciamento de Chillers

Presidência da República
Michel Temer

Ministério do Meio Ambiente
José Sarney Filho

Secretaria Executiva
Marcelo Cruz

Secretaria de Mudança do Clima e Florestas
Everton Frask Lucero

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
SECRETARIA DE MUDANÇA DO CLIMA E FLORESTAS
DEPARTAMENTO DE MONITORAMENTO, APOIO E FOMENTO DE AÇÕES EM MUDANÇA DO CLIMA
COORDENAÇÃO-GERAL DE PROTEÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO

AR CONDICIONADO

Manual sobre Sistemas de Água Gelada

Volume II

APLICAÇÕES – PROJETO,
INSTALAÇÃO E OPERAÇÃO

MMA
Brasília, 2017

Departamento de Monitoramento, Apoio e Fomento de Ações de Mudanças do Clima
Adriano Santhiago de Oliveira

Coordenação-Geral de Proteção da Camada de Ozônio
Magna Leite Luduvice

Coordenação da Atividade
Ana Paula Pinho Rodrigues Leal
Frank Edney Gontijo Amorim
Marina Lopes Ribeiro

Elaboração
Leonilton Tomaz Cleto

Colaboração
Alex Marques da Silva
Cleonice Soares de Araújo
Gabriela Teixeira Rodrigues Lira
Maurício Salomão Rodrigues
Tatiana Lopes de Oliveira

Coordenação do Projeto BRA/12/G77
Secretaria de Mudança do Clima e Florestas
Departamento de Monitoramento, Apoio e Fomento de Ações em Mudança do Clima
Coordenação-Geral de Proteção da Camada de Ozônio
SEPN 505, Lote 2, Bloco B, Ed. Marie Prendi Cruz
CEP: 70.730-542 – Brasília-DF
Telefone: (61) 2028-2272
ozonio@mma.gov.br
www.mma.gov.br/ozonio

Implementação do Projeto BRA/12/G77
Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD
Unidade de Implementação e Monitoramento, Protocolo de Montreal
Setor de Embaixadas Norte, Quadra 802, Conj. C, Lote 17
Brasília-DF, CEP: 70800-400
Tel: (61) 3038-9007
www.protocolodemontreal.org.br

Empresa Contratada para Execução
Somar Engenharia Ltda
Tel: (11) 3763 6964/ 3719 0932

Revisão
Sarah de Oliveira Santana

Arte da Capa
Sara Mota Ribeiro

Diagramação
Emille Catarine Rodrigues Cançado
Renata Ranielle Marinho de Sousa

Dados Internacionais para Catalogação na Publicação - CIP

B823a Brasil. Ministério do Meio Ambiente.

Ar condicionado : manual sobre sistemas de água gelada : aplicações – projeto, instalação e operação / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudança do Clima e Florestas, Departamento de Monitoramento, Apoio e Fomento de Ações em Mudança do Clima. – Brasília, DF: MMA, 2017. 3 v.

185 p. : il. (algumas color). ; gráficos ; v. 2.

ISBN: 978-85-7738-340-5

1.Refrigeração de ar condicionado. 2.Sistema de água gelada. 3.Projetos de sistemas eficientes. 3.Refrigeração. 4.Comissionamento em edificações. 5.Controle de automação. I.Secretaria de Mudança do Clima e Florestas. II.Departamento de Monitoramento, Apoio e Fomento de Ações em Mudança do Clima. III.Título.

CDU: 502.1:614.72

Ministério do Meio Ambiente
Biblioteca

REPRODUÇÃO DESTE DOCUMENTO

Este documento pode ser reproduzido na íntegra ou em parte sem consentimento prévio por escrito desde que a parte reproduzida seja atribuída ao Ministério do Meio Ambiente e ao Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Organograma típico de um projeto convencional 16

Figura 2 – Organograma de um projeto integrado 17

Figura 3 – Organograma de um projeto integrado 18

Figura 4 – Ciclo com os elementos conceituais do projeto integrado 19

Figura 5 – Tela do *CBE Thermal Comfort Tool* com os resultados para a condição 02C 23

Figura 6 – Tela do *CBE Thermal Comfort Tool* com os resultados para a condição 03B 24

Figura 7 – Tela do *CBE Thermal Comfort Tool* com temperatura ambiente de 27 ºC e velocidade do ar de 0,4 m/s 26

Figura 8 – Faixa de umidade relativa do ar para minimizar riscos à saúde humana 30

Figura 9 – Fluxograma esquemático de um sistema com circuito único de água gelada com vazão variável e bombas auxiliares de vazão mínima 35

Figura 10 – Fluxograma esquemático de um sistema com circuito único de água gelada com vazão variável com a associação de *Chillers* em série em contrafluxo entre os circuitos de água gelada e água de resfriamento 36

Figura 11 – Esquema de um sistema dedicado para resfriamento de ar externo indicando o insuflamento de ar externo tratado para as casas de máquinas dos *Fan Coils* que atendem os ambientes condicionados 37

Figura 12 – Esquema de funcionamento de viga fria instalada no forro indicando o fluxo de ar insuflado pelas laterais e o ar de retorno pelo centro 38

Figura 13 – Ilustração de um sistema de viga fria instalada no forro indicando a tubulação de água gelada e o suprimento de ar primário (DOAS) desumidificado e tratado 38

Figura 14 – Sistema de água gelada com aplicação conjunta de vigas frias e DOAS, com associação de *Chillers* em série e circuito único de vazão variável para o sistema DOAS. 39

Figura 15 – Principais atividades do processo de comissionamento desde a concepção até a ocupação e operação do edifício 42

Figura 16 – Fluxograma das atividades de Cx durante a fase de concepção (pré-projeto) 43

Figura 17 – Fluxograma das atividades do OPR durante todo projeto 44

Figura 18 – Fluxograma das atividades do Plano de Cx durante todo projeto 46

Figura 19 – Fluxograma das atividades de Cx durante a fase de projeto 47

Figura 20 – Fluxograma das atividades do BoD durante todo projeto 50

Figura 21 – Fluxograma das atividades de Cx durante a fase de construção 52

Figura 22 – Fluxograma das atividades de Cx durante a fase de ocupação e operação **56**

Figura 23 – Fluxograma esquemático da CAG – Circuitos de Água Gelada **74**

Figura 24 – Fluxograma esquemático da CAG – Circuito de Água de Resfriamento **75**

Figura 25 – Esquema típico dos equipamentos e elementos necessários para controle do sistema de ar condicionado nos ambientes **103**

Figura 26 – Posições recomendadas para instalação do sensor de temperatura de água gelada na tubulação geral de entrada dos *Chillers* **103**

Figura 27 – Posição recomendada para instalação do sensor de temperatura de água gelada na tubulação geral de saída dos *Chillers* **105**

Figura 28 – Posições recomendadas para instalação do sensor de temperatura de água gelada na tubulação geral de alimentação para os equipamentos usuários **105**

Figura 29 – Posições recomendadas para instalação dos sensores de temperatura de água gelada na tubulação geral de alimentação para os equipamentos usuários **106**

Figura 30 – Posição recomendada para instalação dos sensores de temperatura de água de resfriamento na tubulação geral de alimentação para as torres e posição dos sensores de temperatura de saída de água das torres de resfriamento **107**

Figura 31 – Posição recomendada para instalação dos sensores e medidores de vazão de água gelada dos *Chillers*, aplicados para vazão constante **109**

Figura 32 – Posição recomendada para instalação dos sensores e medidores de vazão de água gelada dos *Chillers*, aplicados para vazão variável **110**

Figura 33 – Posição recomendada para instalação dos sensores e medidores de vazão de água gelada nos circuitos principais ou circuitos secundários, com vazão variável **111**

Figura 34 – Posição recomendada para instalação dos sensores e medidores de vazão de água de resfriamento nos *Chillers*. Fluxograma esquemático do controlador de vazão para *Chillers* **111**

Figura 35 – Sistema de água gelada com circuito primário e secundário, com dois *Chillers* operando com 100% de capacidade para atender a carga térmica atual do edifício (67%), na eminência da entrada em operação do terceiro *Chiller* **118**

Figura 36 – Divisão típica de locações de um elemento ou de suas funções **121**

Figura 37 – Tipos de interligações dos elementos sensores com os demais elementos do sistema de automação e os tipos de sinais enviados ou recebidos **121**

Figura 38 – Fluxograma de engenharia esquemático da CAG – circuitos de água gelada **123**

Figura 39 – Fluxograma de engenharia esquemático da CAG – circuito de água de resfriamento **124**

Figura 40 – Fluxograma de engenharia esquemático da CAG – Circuito único de água gelada **137**

Figura 41 – *Approach* no Condensador e no Evaporador de um *Chiller* **148**

Figura 42 – Sistema de água gelada com circuito primário e secundário, com três *Chillers* operando com 100% de capacidade para atender a carga térmica (máxima) do edifício 151

Figura 43 – Sistema de água gelada com circuito primário e secundário, com dois *Chillers* operando com 100% de capacidade para atender a carga térmica atual do edifício (67%) 152

Figura 44 – Sistema de água gelada com circuito primário e secundário, com dois *Chillers* operando com 100% de capacidade para atender a carga térmica atual do edifício (67%), que sofre com a síndrome de baixo ΔT 153

Figura 45 – Sistema de circuito único com vazão de água gelada variável, com três *Chillers* operando com 100% de capacidade para atender a carga térmica (máxima) do edifício 155

Figura 46 – Sistema de circuito único com vazão de água gelada variável, com dois *Chillers* operando com 100% de capacidade para atender a carga térmica atual do edifício (67%) 155

Figura 47 – Sistema de circuito único com vazão de água gelada variável, com dois *Chillers* operando com 100% de capacidade para atender a carga térmica atual do edifício (67%), que sofre com a síndrome de baixo ΔT. 155

Figura 48 – Válvula de alívio de pressão dupla com válvula de 3 Vias acoplada 165

Figura 49 – Disco de ruptura 165

Figura 50 – Plugue fusível 165

Figura 51 – Válvulas de alívio de pressão dos trocadores de calor de um *Chiller* 165

Figura 52 – Encaminhamento da tubulação de descarga para a atmosfera das válvulas de alívio de pressão dos *Chillers* de uma central de água gelada 167

Figura 53 – Válvula de alívio de pressão no estado estático – Contrapressão superimposta 169

Figura 54 – Válvula de alívio de pressão no estado dinâmico – Contrapressão da linha 169

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação entre os conceitos do processo de projeto integrado com o processo de um projeto convencional 16

Quadro 2 – Mentalidade, princípios e estratégias para o projeto integrado 19

Quadro 3 – Legenda com siglas e abreviações de termos utilizados nos formulários dos testes funcionais de desempenho (itens 3.9.3 a 3.9.9) 76

Quadro 4 – Teste 1 78

Quadro 5 – Teste 2 79

Quadro 6 – Teste 3 79

Quadro 7 – Teste 4 81

Quadro 8 – Teste 5 **82**

Quadro 9 – Teste 6 **83**

Quadro 10 – Teste 7 **83**

Quadro 11 – Teste 8 **84**

Quadro 12 – Teste 9 **84**

Quadro 13 – Teste 10 **85**

Quadro 14 – Teste 11 **85**

Quadro 15 – Teste 12 **86**

Quadro 16 – Teste 13 **87**

Quadro 17 – Teste 14 **87**

Quadro 18 – Teste 15 **88**

Quadro 19 – Teste 16 **89**

Quadro 20 – Teste 17 **89**

Quadro 21 – Teste 18 **90**

Quadro 22 – Teste 19 **92**

Quadro 23 – Teste 20 **93**

Quadro 24 – Teste 21 **94**

Quadro 25 – Teste 22 **94**

Quadro 26 – Teste 23 **95**

Quadro 27 – Teste 24 **96**

Quadro 28 – Teste 25 **96**

Quadro 29 – Teste 26 **97**

Quadro 30 – Pontos de medição que devem constar nos gráficos de tendências de um sistema de automação **114**

Quadro 31 – Símbolos indicativos de locação de um elemento ou de suas funções **120**

Quadro 32 – Notação dos elementos sensores ou transmissores e suas funções **122**

Quadro 33 – Impacto do *approach* no desempenho dos *Chillers*, causas prováveis e recomendações de manutenção **149**

Quadro 34 – Classificação dos fluidos refrigerantes em grupos de segurança, conforme a ***ABNT NBR 16069:2010*** e o ***ANSI/ASHRAE Standard 34*** 162

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Alguns valores para clo 21

Tabela 2 – Alguns valores para met 21

Tabela 3 – Resultados de PMV e PPD para as diversas condições da Figura 5 22

Tabela 4 – Impactos da mudança da condição 01 para as condições 02, 03 e 04 25

Tabela 5 – Comparação entre valores de relação de área por carga térmica utilizando como parâmetros os requisitos mínimos de eficiência energética do ***ASHRAE Standard 90.1*** em diferentes versões 27

Tabela 6 – Comparação entre os requisitos mínimos de eficiência energética para vários tipos de *Chillers*, estabelecidos pelo ***ASHRAE Standard 90.1-2016, versão I-P vs. versão SI*** 27

Tabela 7 – Comparação entre valores de referências tradicionais adotadas em projetos de sistemas de água gelada e novas referências, com vistas a otimização energética 29

Tabela 8 – Resultados do dimensionamento do sistema de água gelada **S1**, utilizando as referências tradicionais 31

Tabela 9 – Resultados do dimensionamento de um sistema de água gelada **S2**, utilizando novas referências 31

Tabela 10 – Aplicabilidade de cada um dos itens do BoD nos principais sistemas prediais 49

Tabela 11 – Dados de projeto do CH-03 59

Tabela 12 – Teste de Desempenho do CH-03 – Leituras de Dados 1 a 6 67

Tabela 13 – Teste de Desempenho do CH-03 – Leituras de Dados 7 a 11 68

Tabela 14 – Comparação de dados de campo do CH-03 com os resultados do *software* do fabricante – Leituras 1 a 6 70

Tabela 15 – Comparação de dados de campo do CH-03 com os resultados do *software* do fabricante – Leituras 7 a 11 71

Tabela 16 – Discrepâncias entre medições de vazão na tela do BMS e medições reais em campo utilizando medidor de vazão de referência 116

Tabela 17 – Variação do *approach* de projeto em torre de resfriamento operando com a mesma vazão de água e o mesmo diferencial de temperatura de água 150

Tabela 18 – Dados de projeto “absurdo” de um sistema de água gelada. 156

Tabela 19 – Dados de projeto real de um sistema de água gelada. 157

Tabela 20 – Pressões mínimas de projeto para componentes do sistema de refrigeração, em função do fluido refrigerante, conforme a ***ABNT NBR 16069:2010*** 164

Tabela 21 – Valores típicos para o fator de fricção de *Moody* para fluxos inteiramente turbulentos 168

Tabela 22 – Intervalo máximo para inspeções de seguranças periódicas, conforme a ***NR-13*** 170

Tabela 23 – Categorias dos vasos de pressão, conforme a ***NR-13*** 171

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Carta de conforto com faixas de 1,0 clo e 0,5 clo para um ambiente de escritório 22

Gráfico 2 – Comparativo entre os resultados de potência total no dimensionamento de um sistema de água gelada utilizando as referências tradicionais e as novas 32

Gráfico 3 – Curva de potencial de economias e curva de custo de correção em cada etapa de um projeto, desde a concepção até a operação 42

Gráfico 4 – Temperaturas de Água Gelada no CH-03 62

Gráfico 5 – Vazão de Água Gelada no CH-03 63

Gráfico 6 – Capacidade do CH-03 63

Gráfico 7 – Temperaturas de Água de Resfriamento no CH-03 64

Gráfico 8 – Vazão de Água de Resfriamento no CH-03 64

Gráfico 9 – Potência Absorvida no Motor do CH-03 65

Gráfico 10 – Eficiência Energética (COP) do CH-03 65

Gráfico 11 – Perfil de Carga do CH-03 66

Gráfico 12 – Comparação de dados de campo do CH-03 com os resultados do *software* do fabricante – Capacidade 71

Gráfico 13 – Comparação de dados de campo do CH-03 com os resultados do *software* do fabricante – COP (Eficiência Energética) 72

Gráfico 14 – Relação entre a porcentagem de vazão de água gelada e a porcentagem de capacidade de resfriamento de uma serpentina 153



SUMÁRIO

1	PROJETOS DE SISTEMAS EFICIENTES DE ÁGUA GELADA	15
2	NOVAS CONCEPÇÕES DE SISTEMAS DE AR CONDICIONADO E SISTEMAS DE ÁGUA GELADA	35
3	PROCESSO DE COMISSIONAMENTO EM EDIFICAÇÕES	41
4	SISTEMAS DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO	101
5	OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO	147
6	SEGURANÇA	161
7	GLOSSÁRIO	175
8	REFERÊNCIAS	181
9	CRÉDITOS DAS IMAGENS	185



PREFÁCIO

O Protocolo de Montreal sobre Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio é um tratado internacional que objetiva proteger a camada de ozônio por meio da eliminação da produção e consumo das Substâncias Destruidoras do Ozônio (SDOs). Estabelecido em 1987, este acordo entrou para a história ao se tornar o primeiro tratado sobre o meio ambiente a ser universalmente ratificado por 197 Estados-Partes.

Para auxiliar os países em desenvolvimento, em 1990 foi instituído o Fundo Multilateral para a Implementação do Protocolo de Montreal (FML) que visa prover assistência técnica e financeira para o cumprimento dos cronogramas específicos de eliminação das substâncias químicas controladas.

O Brasil promulgou os textos da Convenção de Viena para Proteção da Camada de Ozônio e do Protocolo de Montreal por meio do Decreto n° 99.280, de 06 de junho de 1990, assumindo os prazos e compromissos estabelecidos. Desde 1988 o País realiza ações para a proteção da camada de ozônio, já tendo eliminado o consumo dos CFCs (clorofluorcarbonos), Halon, CTC (tetracloreto de carbono) e brometo de metila das práticas agrícolas.

Na 47ª reunião do Comitê Executivo do FML, em 2005, foi aprovado o desenvolvimento de um projeto demonstrativo com o objetivo de aumentar o interesse pela substituição de resfriadores de líquidos (*Chillers*) com CFCs por equipamentos energeticamente eficientes e livres dessas substâncias. Tal iniciativa deu origem ao Projeto Demonstrativo para o Gerenciamento Integrado do Setor de *Chillers* (*Projeto BRA/12/G77*) que tem como finalidade estimular projetos otimizados e processos de retrocomissionamento em sistemas de ar condicionado de edifícios existentes, em busca de uma operação eficiente que proporcione redução de custos e conforto ao usuário.

O projeto envolveu uma série de atividades, tais como cursos e seminários para capacitação de engenheiros e técnicos especializados que atuam com projeto, instalação, operação e manutenção de sistema de ar condicionado de edificações públicas e privadas; a publicação de materiais técnicos, a divulgação de informações e a realização de quatro processos de retrocomissionamento, sendo duas edificações públicas e duas privadas, com o objetivo de divulgar informações e resultados motivadores que aumentem o interesse por ações semelhantes. Todas essas ações têm como objetivo apresentar procedimentos atualizados, com base nas normas técnicas nacionais e internacionais, para o adequado funcionamento do sistema de ar condicionado que proporcione conforto aos usuários, sem deixar de lado aspectos extremamente importantes como os custos de operação e manutenção, a eficiência energética e a proteção ao meio ambiente.

Esta publicação trata da utilização de *Chillers* em sistemas de água gelada, destacando os principais conceitos adotados no setor, os componentes de uma instalação, as tipologias adotadas, a eficiência relacionada ao aspecto da refrigeração e da energética, bem como das tecnologias existentes para a realização de *retrofit* visando à substituição dos fluidos frigoríficos controlados pelo Protocolo de Montreal, tais como o clorofluorcarbanos (CFCs) e hidroclorofluorcarbonos (CFCs).

Este material é destinado principalmente ao aperfeiçoamento dos conhecimentos técnicos de engenheiros, técnicos especializados, professores, estudantes e gestores de edificação no que tange ao eficiente funcionamento de uma instalação de ar condicionado. Espera-se que os conceitos e procedimentos apresentados aqui façam parte do dia-a-dia do trabalho desses profissionais.

Everton Fask Lucero
Secretário de Mudança do Clima e Florestas



1 PROJETOS DE SISTEMAS EFICIENTES DE ÁGUA GELADA

1.1 PROCESSO DE PROJETO INTEGRADO

A fase mais importante da construção de um sistema consiste no desenvolvimento do projeto, desde a fase conceitual até a elaboração das especificações para contratação dos fornecedores. Um projeto que nasce deficiente **sempre** resultará em um sistema ruim, com diversos problemas que podem prejudicar o seu funcionamento adequado. Um projeto que nasce eficiente **pode** resultar em um sistema bom, pois dependerá diretamente dos demais participantes envolvidos e do acompanhamento contínuo do projeto durante o processo de construção. A rigor, as atividades de projeto deveriam continuar por todo o processo de construção até o início da operação. Em um sistema de ar condicionado de um edifício, a equipe de projeto deve estar presente desde a sua concepção até a fase de ocupação pelos usuários.

A maioria dos projetos de construção de um edifício tem a sua fase conceitual tratada apenas por arquitetos, com grande ênfase na definição da envoltória e na concepção dos interiores. Normalmente, os demais sistemas prediais que envolvem as disciplinas de engenharia são tratados apenas na fase de detalhamento do projeto arquitetônico. O projeto do sistema de ar condicionado é um deles. Isso traz muitas dificuldades para o desenvolvimento de um projeto do sistema de ar condicionado eficiente, pois alguns conceitos importantes não foram considerados durante a sua concepção.

Os principais impactos de um sistema de ar condicionado ser concebido a partir de um projeto arquitetônico quase pronto estão relacionados à distribuição de ar (que afeta diretamente o conforto térmico dos usuários) e à eficiência energética. Os impactos do projeto arquitetônico sobre a eficiência energética talvez sejam os maiores em todo processo de elaboração de um projeto do sistema de ar condicionado.

Mesmo utilizando a concepção de tecnologias eficientes e a seleção de componentes eficientes para o sistema de ar condicionado, se a carga térmica resultante do projeto arquitetônico for elevada (devido a vários fatores), e se o projeto arquitetônico não permitir uma distribuição de ar adequada nos ambientes climatizados, a eficiência energética do sistema de ar condicionado já nasce prejudicada.

Portanto, no conceito de edifícios de alto desempenho, e isso inclui empreendimentos que buscam certificações do tipo Edifícios Verdes ou Edifícios Sustentáveis, é essencial a adoção do processo de Projeto Integrado, termo mais aplicado, mas o melhor seria utilizar Concepção Integrada ou *Design* Integrado (do inglês *Integrated Design*), porque abrange todo o ciclo de desenvolvimento de um projeto desde a sua concepção.

No processo do projeto integrado, as equipes de arquitetura e engenharia iniciam a concepção e o desenvolvimento dos projetos de maneira integrada, com análise paralela dos possíveis resultados e impactos sobre todos os aspectos do conforto ambiental e da eficiência energética do edifício (não apenas do sistema de ar condicionado). Assim, o processo de projeto integrado permite obter maiores ganhos nos resultados de desempenho (não apenas de otimização da eficiência energética, mas em todos os aspectos) do edifício para os proprietários e usuários, conforme os requisitos de projeto do proprietário.

O Quadro 1 apresenta os principais conceitos aplicados no processo do projeto integrado comparados com o processo de um projeto convencional.

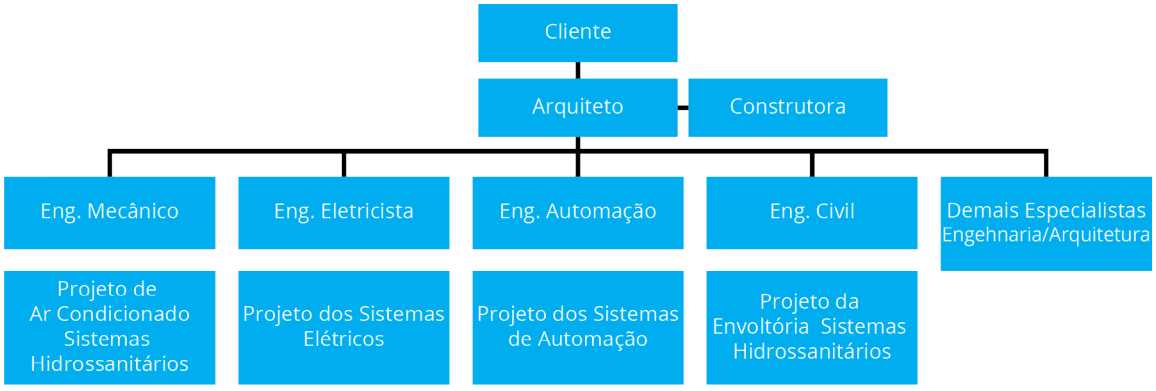
Outra comparação importante é o conceito do organograma e da estrutura de execução das atividades entre o processo de um projeto convencional e o processo do projeto integrado, como indicado nas Figuras 1 e 2.

Quadro 1 – Comparação entre os conceitos do processo de projeto integrado com o processo de um projeto convencional

Processo de Projeto Integrado	Processo de um Projeto Convencional
Inclusivo desde o início	Os membros participam apenas quando é essencial
Muito planejamento e colaboração no estágio inicial – Tempo e energia bem investidos	Menor tempo e menor colaboração no estágio inicial
As decisões influenciadas por toda equipe	Muitas decisões tomadas por poucos
Processo iterativo	Processo linear
Visão do edifício como um todo, isto é abrangendo todos os sistemas	Os sistemas são isolados. Cada um só enxerga o que é seu
Busca por sinergia entre as disciplinas	Poucas oportunidades para sinergia
Análise de custo baseada na vida útil do edifício	Análise de custo do investimento inicial
O projeto se envolve com o edifício desde a concepção até a ocupação e a operação	O projeto se envolve apenas até o início da obra

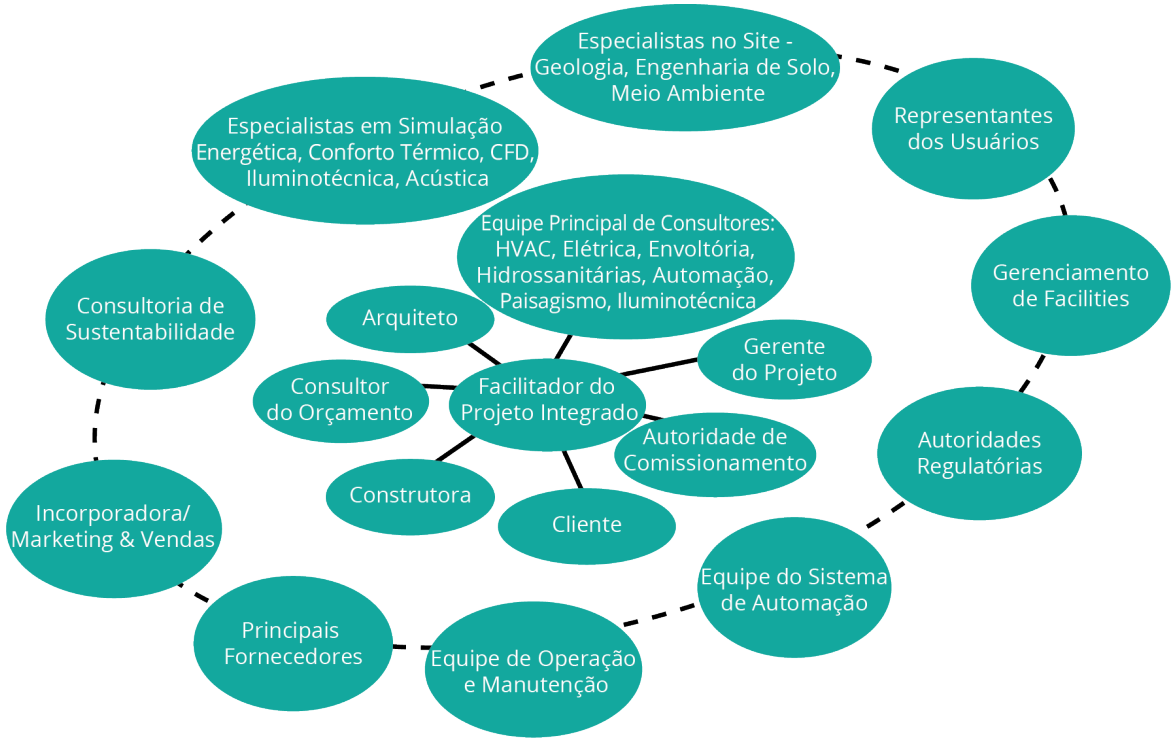
Fonte: BUSBY PERKINS+WILL, 2007.

Figura 1 – Organograma típico de um projeto convencional



Fonte: BUSBY PERKINS+WILL, 2007.

Figura 2 – Organograma de um projeto integrado



Fonte: BUSBY PERKINS+WILL, 2007.

A Figura 3 mostra um exemplo prático das atividades da arquitetura e da engenharia para a aplicação de UFAD dispersão de ar com insuflamento pelo piso elevado (UFAD, do inglês *"underfloor air distribution"*). No processo de um projeto convencional, toda a concepção é desenvolvida pela arquitetura e entregue à engenharia para o detalhamento. Em um processo de projeto integrado, a concepção requer um processo iterativo no qual a comunicação e o trabalho em equipe entre os envolvidos das duas disciplinas é essencial.

Para a aplicação do processo do projeto integrado, é preciso que haja uma mudança de mentalidade na forma de trabalhar em relação à estrutura dos projetos convencionais. Um dos fatores mais importantes é a percepção das habilidades de todos os membros da equipe para as contribuições em cada aspecto abordado no projeto. E muitas dessas ações não estarão escritas nos procedimentos, mas a partir do processo documentado como um guia para o desenvolvimento, muitas delas serão aprendidas e aprimoradas apenas vivendo a experiência de fazer juntos.

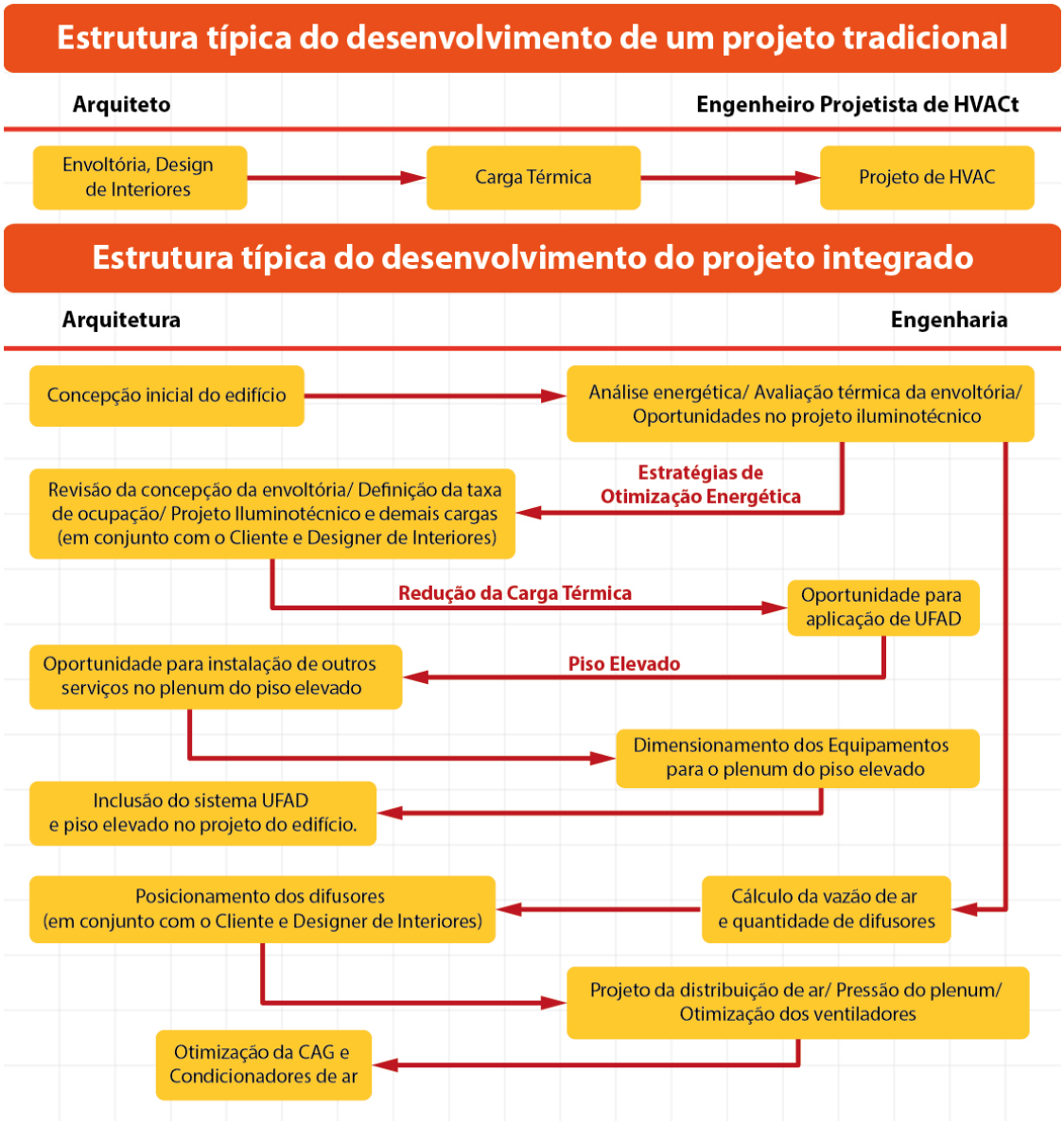
Os princípios, em combinação com as estratégias listadas, apresentados no Quadro 2 são vitais para o processo do projeto integrado.

Outra característica do processo do projeto integrado é o foco não no sistema (predial), mas no objetivo final do edifício, que é um lugar para os usuários viverem bem. A Figura 4 mostra o ciclo do processo integrado, com os elementos conceituais que devem guiar as atividades das equipes de projeto, de modo a obter resultados efetivos sobre o objetivo final do edifício.

O processo do projeto integrado necessariamente inclui o uso das ferramentas da Modelagem de Informação da Construção (BIM,do inglês, *Building Information Modeling* ou) e de simulação energética do edifício.

O BIM aplicado ao projeto integrado é essencial não apenas como ferramenta para os desenhos do sistema (em 3D) e geração de lista de materiais, mas como um importante visualizador auxiliar nas questões de estética dos sistemas prediais envolvendo desde a verificação de interferências até os espaços necessários para acesso e manutenção de equipamentos.

Figura 3 – Organograma de um projeto integrado



Fonte: CUBI, E.M., KEITH D., LOVE J., 2009.

Um dos maiores potenciais do BIM é a sua integração ao *software* de simulação energética do edifício. A simulação energética é muito mais que uma simples ferramenta a ser aplicada em programas de certificação de edifícios sustentáveis, para verificar os pontos obtidos com a eficiência energética, e deve ser aplicada no projeto integrado sobre as medidas de otimização potencialmente aplicáveis no projeto do edifício, incluindo os seguintes aspectos:

- Materiais de construção (paredes, tetos, vidros, áreas de janelas);
- Orientação da planta do edifício;
- Aplicação do sistema de iluminação incluindo os potenciais de aproveitamento de luz natural;
- Sistema de ar condicionado, desde o cálculo e as estratégias para redução da carga térmica, até as várias alternativas possíveis de sistemas mecânicos de condicionamento de ar;

Quadro 2 – Mentalidade, princípios e estratégias para o projeto integrado

Mentalidade	Princípio	Estratégias
Inclusão e colaboração	Equipe colaborativa ampla	Formar uma equipe comprometida
Orientada para resultados	Escopo bem definido, com visão e objetivos claros	Equipe de projeto "do Edifício"
Confiança e transparência	Comunicação livre e efetiva	Prover treinamento em comunicação para toda equipe
Mente aberta e criatividade	Inovação e síntese	Promover *workshops*, "Charretes" e muita discussão em grupo
Rigor e atenção para os detalhes	Tomadas de decisões sistemáticas	Matriz de decisões e objetivos
Aprendizado contínuo e busca por melhorias	Processo iterativo com ciclos de avaliações	Avaliação pós-ocupação Comissionamento abrangente

Fonte: BUSBY PERKINS+WILL, 2007.

Figura 4 – Ciclo com os elementos conceituais do projeto integrado



Fonte: NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCE, 2015.

- Sistemas auxiliares consumidores de energia.

Todos esses e outros elementos, que podem ser incluídos com o detalhamento de todo o projeto e revisados até o projeto executivo, com os equipamentos e sistemas contratados, poderão servir de base para uma contínua avaliação do desempenho energético do edifício, ao longo da sua vida útil, com ajustes (calibração da simulação) tendo como base os dados reais de desempenho verificados para cada sistema.

É importante mencionar que na simulação energética do edifício o cálculo do desempenho energético é realizado hora a hora, durante período de funcionamento do edifício, considerando ainda as condições climáticas da localidade, ao longo de um ano.

Finalmente, outro processo concomitante e essencial para o sucesso de um projeto integrado é o comissionamento, que se desenvolve desde a fase de concepção do projeto. No capítulo 3, o processo de comissionamento será abordado com mais detalhes, mas por ora pode-se dizer que a autoridade de comissionamento dentro do processo do projeto integrado é o responsável por verificar que os requisitos de projeto do proprietário estão sendo atendidos e manter a equipe do projeto com o foco neles.

1.2 REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA

A medida de otimização mais importante na busca de um sistema de ar condicionado eficiente é a redução da carga térmica. Por mais eficiente que sejam os equipamentos, se a carga térmica for elevada, maior será o consumo de energia.

Durante o processo de otimização do projeto integrado, desde a concepção inicial, há muitas oportunidades de redução de carga térmica e muitas delas podem contribuir muito com a equipe de arquitetura para melhor definir os componentes e as estratégias de concepção da envoltória.

Outras cargas importantes, que após otimização podem reduzir a carga térmica, são as do sistema de iluminação, principalmente quando é possível aplicar soluções (em conjunto com a arquitetura) de aproveitamento da luz natural, com um mínimo ganho de radiação solar para o interior do edifício.

Apesar de serem óbvias, é muito difícil que as oportunidades de melhorias sejam tratadas em um projeto convencional. No entanto, é importante destacar essas questões para que haja uma mudança de mentalidade sobre a importância do estudo da carga térmica e expor a necessidade da integração com as atividades das demais disciplinas do projeto.

1.2.1 CONFORTO TÉRMICO

Além desses aspectos, a definição dos parâmetros de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e velocidade do ar para garantir o conforto térmico nas zonas ocupadas pelos usuários, irão trazer impactos no resultado do cálculo da carga térmica.

Os requisitos de conforto térmico para os ambientes condicionados típicos podem ser obtidos na norma brasileira ***ABNT NBR 16401:2017 Parte 2 – Instalações de Ar Condicionado Sistemas Centrais e Unitários – Parâmetros de Conforto Térmico***, que estabelece os requisitos de temperatura e umidade relativa, e velocidade do ar na zona ocupada, associados ao tipo de vestimenta dos usuários e suas atividades físicas típicas no ambiente condicionado.

A nova versão tem como referência o ***ASHRAE Standard 55-2013 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*** e inclui o conceito de conforto adaptativo, que pode reduzir significativamente a aplicação de sistemas mecânicos de condicionamento de ar e permite a utilização de sistemas híbridos ou mistos, que incluem a operação conjunta de sistemas de ar condicionado e ventilação mecânica ou natural no mesmo ambiente, para garantir o conforto térmico em níveis aceitáveis estabelecidos pela norma.

No entanto, é muito comum verificar a adoção de parâmetros de conforto com temperaturas mais baixas, que obviamente resultam no aumento da carga térmica do sistema de ar condicionado, e que podem trazer real desconforto aos usuários.

Dois fatores pessoais muito importantes para o conforto térmico dos usuários, considerados na ***ABNT NBR 16401:2017 Parte 2*** e que causam impactos diretos na determinação das condições ambientes e no cálculo de carga térmica, são os seguintes:

- **Índice de vestimenta –** é expresso em "clo" e relaciona a resistência térmica média à troca de calor do corpo humano com o ambiente, causada pela vestimenta do usuário – 1 clo = 0,155 m²K/W. A Tabela 1 mostra valores de clo para algumas vestimentas típicas.
- **Nível de atividade física das pessoas –** é expresso em "met" e determina a taxa de metabolismo dos usuários no ambiente – 1 met = 58,2 W/m². Admitindo a superfície média de 1,8 m² para o corpo de um adulto, 1 met equivale a aproximadamente 105 W. A Tabela 2 mostra valores de met para algumas atividades físicas típicas.

A análise do conforto térmico considera também as avaliações de sensação térmica dos usuários e são resumidas em dois índices:

Tabela 1 – Alguns valores para clo

Vestimenta	clo
Típica de Verão (Calça leve ou saia e camisa de manga curta)	0,50
Calça ou saia e camisa de manga comprida	0,61
Calça ou saia com meia-comprida, camisa de manga comprida, paletó, jaqueta.	0,96
Típica de Inverno (calça, camisa de manga comprida, blusa)	1,00
1 clo = 0,155 m² • K/W	

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 2 – Alguns valores para met

Atividade	clo
Sentado, parado	1,0
Sentado, digitando	1,1
De pé, relaxado	1,2
Andando, normal	1,7
Andando a 3,2 km/h	2,0
1 met = 58,2 W/m²	

Fonte: Elaboração do autor.

- **PMV** (*Predict Mean Vote*) – Voto Médio Previsto – que prevê o valor médio dos votos de um grande grupo de pessoas na escala de sensibilidade térmica de sete pontos, que pode variar de -3,0 (muito frio) a +3,0 (muito quente), com o ponto ideal igual a 0,0 (sensação neutra) e os limites de tolerância para o conforto térmico entre -0,5 e +0,5;
- **PPD** (*Predicted Percentage of Dissatisfied*) – Percentual Previsto de Insatisfeitos – que estabelece uma previsão quantitativa da porcentagem de usuários insatisfeitos termicamente, determinadas pelo PMV, com um mínimo de 5,0% (nunca será possível agradar a todos) e o limite de tolerância de 10,0%.

O Gráfico 1 indica quatro condições de temperatura e umidade relativa, aplicados em uma carta de conforto, tendo como referência as faixas com os índices de vestimenta de 1,0 clo e 0,5 clo, para atividades típicas de escritórios (met 1,1) para valores de PMV dentro da faixa de tolerância (+/- 0,5).

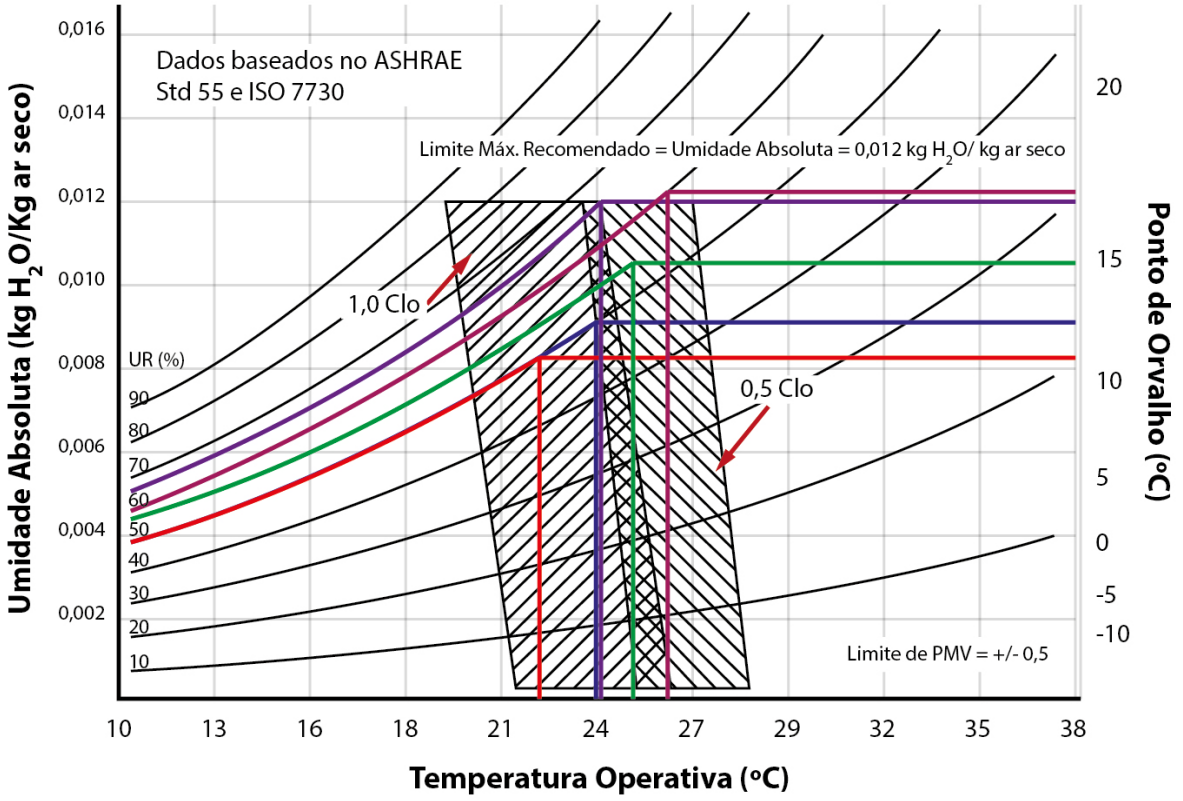
Notas:

- As linhas em Azul indicam a Condição 01 – que é a típica aplicada em ambientes condicionados – TBS = 24 ºC e UR= 50%.
- As linhas em Vermelho indicam a Condição 02 – mais fria em relação à Condição 01, considerando que os usuários estarão mais "agasalhados" no verão e/ou em atividades físicas mais "intensas" dentro do ambiente do escritório – TBS = 22 ºC e UR= 50%. Essa condição vem sendo muito utilizada como premissa em projetos de ar condicionado.
- As linhas em Verde indicam a Condição 03 – mais quente em relação à Condição 01, contudo, considerando que os usuários estarão com vestimentas leves e atividades normais dentro do ambiente de escritório – TBS = 25 ºC e UR= 55%.
- As linhas em Rosa indicam a Condição 04 – mais quente em relação à Condição 01, típica para os ambientes condicionados em edifícios que utilizam sistemas VRF – TBS = 24 ºC e UR= 65%.
- As linhas em Marrom indicam a Condição 05 – condição de ajuste para os ambientes condicionados nos edifícios públicos do Japão, onde se exige o uso de vestimentas leves no verão e é aceitável uma pequena penalidade no conforto térmico – TBS = 26 ºC e UR= 60%.

Utilizando o aplicativo ***CBE Thermal Comfort Tool***[1], desenvolvido no ***Center for the Built Environment***, da Universidade da Califórnia, em Berkeley, nos EUA, é possível verificar na Tabela 3 o impacto das condições

[1] Disponível em: <http://cbe.berkeley.edu/comforttool/>

Gráfico 1 – Carta de conforto com faixas de 1,0 clo e 0,5 clo para um ambiente de escritório



Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 3 – Resultados de PMV e PPD para as diversas condições da Figura 5

Condição	T_{BS}	T_R	UR	V_{ar}	clo	met	PMV	PPD	Sensação
	(ºC)	(ºC)	(%)	(m/s)				(%)	
01A	24,0	26,0	50	0,1	0,61	1,1	0,07	5,0	Neutra
01B	24,0	26,0	50	0,1	**0,50**	1,1	-0,15	5,0	Neutra
01C	24,0	**24,0**	50	0,1	**0,50**	1,1	-0,46	9,0	Neutra
02A	22,0	24,0	50	0,1	1,00	1,1	0,13	5,0	Neutra
02B	22,0	24,0	50	0,1	**0,50**	1,1	-0,83	20,0	Frio
02C	22,0	**22,0**	50	0,1	**0,50**	1,1	-1,13	32,0	Frio
03A	25,0	27,0	55	0,1	0,50	1,1	0,22	6,0	Neutra
03B	25,0	27,0	55	0,1	**0,61**	1,1	0,38	8,0	Neutra
03C	25,0	**25,0**	55	0,1	0,50	1,1	-0,09	5,0	Neutra

(continua)

Condição	T_{BS}	T_R	UR	V_{ar}	clo	met	PMV	PPD	Sensação
04	24,0	26,0	65	0,1	0,50	1,1	-0,04	5,0	Neutra
05	26,0	28,0	60	0,1	0,50	1,1	0,60	13,0	Quente

Fonte: Elaboração do autor.

ambientais indicadas no Gráfico 1 sobre os índices de conforto PMV e PPD, baseados no ***ASHRAE Standard 55***.

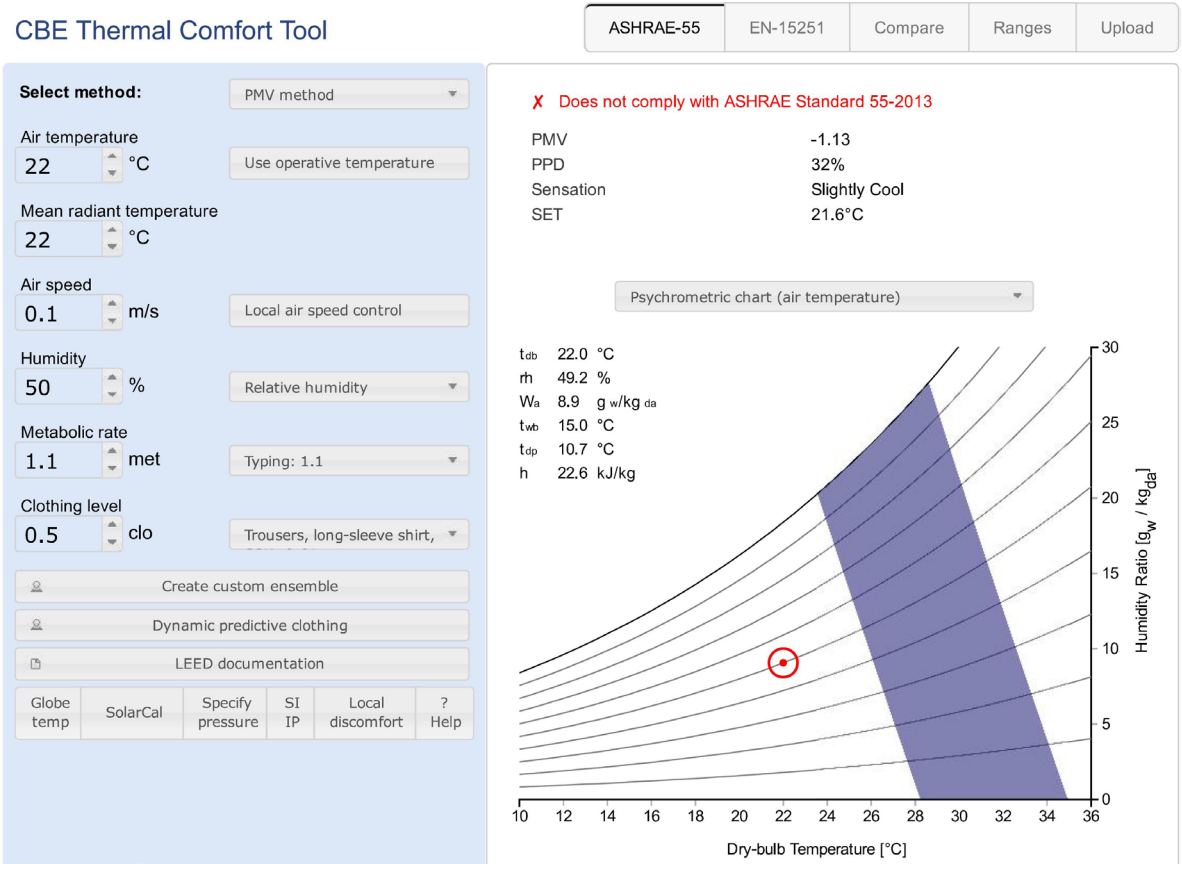
O aplicativo permite a avaliação do conforto térmico, pelos métodos de PMV ou de conforto adaptativo e utiliza como referência o ***ASHRAE Standard 55-2013*** ou a norma europeia **EN 15251:2007**.

A Figura 5 mostra a tela gráfica do aplicativo. Do lado esquerdo são inseridos os dados de operação do ambiente (temperatura ambiente e temperatura radiante média, velocidade do ar, umidade relativa), o índice de vestimenta (clo) e o nível de atividade física (met) dos usuários.

Outros dados auxiliares podem ser utilizados para melhor definir as condições do ambiente, incluindo um conceito de previsão dinâmica da vestimenta típica dos usuários, a partir das condições meteorológicas do ar externo previstas para o dia na localidade, que pode ser integrado ao sistema de automação do edifício para alterar os valores de *setpoint* das condições de operação do ambiente interno e permitir um controle dinâmico do conforto térmico baseado nos índices de PMV e PPD.

Os resultados são disponibilizados à direita, com os valores de PMV, PPD calculados e um gráfico com a carta psicrométrica, com a faixa de conforto para

Figura 5 – Tela do *CBE Thermal Comfort Tool* com os resultados para a condição 02C



Fonte: CENTER FOR THE BUILT ENVIRONMENT, 2016.

atender os índices PMV e PPD marcada em azul. O ponto em vermelho indica as condições de temperatura e umidade do ambiente.

A Figura 5 indica os resultados no ***CBE Thermal Comfort Tool*** para a condição 02C da Tabela 3, com os usuários utilizando vestimentas leves (clo 0,5) e com temperatura radiante igual à temperatura do ambiente (áreas internas), em 22 ºC. O resultado é de desconforto, com PMV de -1,13 (frio) e índice de insatisfação (PPD) de 32%. No gráfico, é possível verificar que o ponto de operação está fora da faixa de conforto.

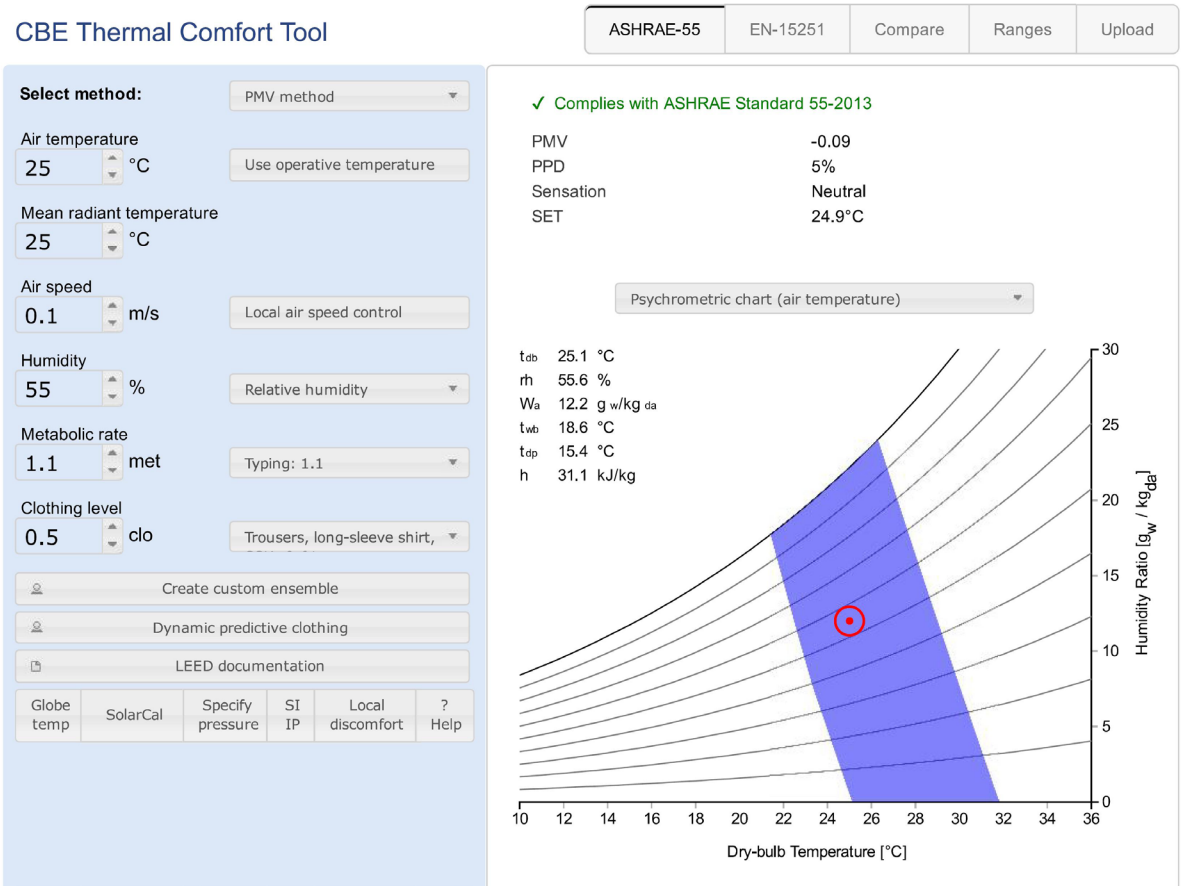
A Figura 6 mostra os resultados para a condição **03C**, com os mesmos dados de entrada da condição **02C**, porém com temperatura do ambiente (áreas internas) em 25,0 ºC e umidade relativa em 55%. Nestas condições, o ponto de operação está dentro da faixa de conforto, e o resultado indica que o ambiente está confortável, com PMV de -0,09 (neutro) e PPD de 5% (nível mínimo de insatisfação).

Comparando as condições apresentadas nas Figuras 5 e 6, é possível verificar que durante o verão, quando os usuários normalmente utilizam vestimentas mais leves, a condição **03C**, com temperatura e umidade relativa do ambiente mais elevadas, propicia maior conforto aos usuários, enquanto a condição **02C** deve registrar um índice elevado de reclamações quanto à sensação de frio.

Após análise dos impactos sobre o conforto térmico, o próximo passo é a verificação do impacto no aumento ou redução da carga térmica e os impactos no desempenho energético do sistema.

A Tabela 4 utiliza as condições típicas do Gráfico 1 e mostra os quais seriam os impactos nos resultados de cálculo de carga térmica e em alguns parâmetros para dimensionamento dos equipamentos

Figura 6 – Tela do *CBE Thermal Comfort Tool* com os resultados para a condição 03B



Fonte: CENTER FOR THE BUILT ENVIRONMENT, 2016.

Tabela 4 – Impactos da mudança da condição 01 para as condições 02, 03 e 04

Impacto na Mudança da Condição 01 para a:	Condição 02 (22 °C/ 50%)	Condição 03 (25 °C/ 50%)	Condição 04 (24 °C/ 65%)
Vazão de Ar – *Fan Coil*	↑ 14%	↓ 16%	↓ 17%
Carga Térmica – Ar Externo	↑ 37%	↓ 19%	↓ 18%
Carga Térmica da Sala	↑ 18%	↓ 9%	↓ 16%
Capacidade da Serpentina	↑ 23%	↓ 5%	↓ 15%
Temperatura de Insuflação	13,0 °C → 10,7 °C	13,0 °C → 14,0 °C	13,0 °C → 16,7 °C
COP CHILLER = 6,15 (Ref)	↓ 5%	↑ 2%	↑ 12%

Fonte: Elaboração do autor.

do sistema de ar condicionado, com a alteração das condições de conforto nos ambientes. As variações são em relação à Condição 01.

Na primeira coluna (Condição 01 → 02), com a alteração dos parâmetros de projeto dos ambientes condicionados da condição 01 para a condição 02, haverá um aumento de 18% na carga térmica do sistema e um aumento de 14% na vazão de ar dos condicionadores de ar, o que representa cerca de 37% de aumento da potência absorvida nos motores ventiladores. Haverá ainda uma diminuição de 5% no COP dos *Chillers*.

Na segunda coluna (Condição 01 → 03), com a alteração dos parâmetros de projeto dos ambientes condicionados da condição 01 para a condição 03, haverá uma redução de 9% na carga térmica do sistema e uma redução de 16% na vazão de ar dos condicionadores de ar, o que representa cerca de 29% de redução da potência absorvida nos motores ventiladores. Haverá ainda um aumento de 2% no COP dos *Chillers*.

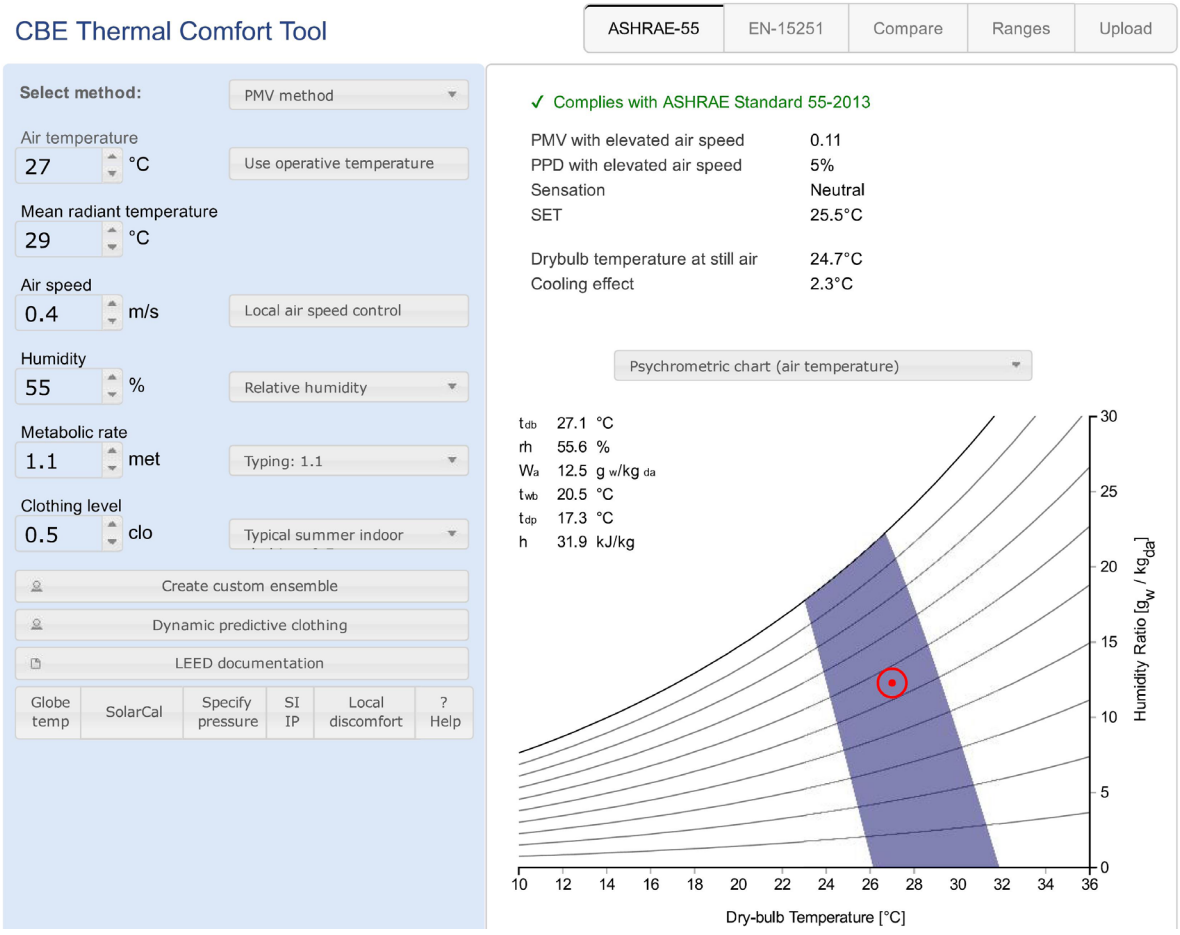
A terceira coluna (Condição 01 → 04), mostra os resultados de um projeto com sistema de água gelada com os mesmos parâmetros de conforto utilizados para os projetos atuais com sistemas do tipo VRF. A redução de carga térmica será ainda maior (17%) e haverá um aumento de COP nos *Chillers* da ordem de 12%. No entanto, é importante observar que o limite de umidade relativa recomendado pela ASHRAE é de 60%, valor que nem sempre é possível garantir em instalações com sistemas do tipo Split e VRF.

O aplicativo ***CBE Thermal Comfort Tool*** é uma ferramenta muito útil e pode ser aplicada para monitoração e verificação dos índices de conforto dos ambientes climatizados. Dentro dos novos conceitos de conforto ambiental, a temperatura do ambiente deixa de ser o elemento direto de controle e com o auxílio de aplicativos comandados pelos usuários, os resultados de PMV e PPD se tornam os reais controladores do sistema, com flexibilidade para alterar temperatura, umidade relativa e velocidade do ar na zona ocupada em função das respostas em tempo real dos usuários.

Embora uma única temperatura (estática) possa ser utilizada para estabelecer a situação confortável, o prazer térmico (do termo em grego, *aliesthesia*) é geralmente causado por diferentes sensações térmicas. Os modelos adaptativos de conforto térmico descritos na ***ABNT NBR 16401:2017 Parte 2*** permitem flexibilidade na concepção de edifícios com ventilação natural com condições mais variadas nos ambientes ocupados. Tais edifícios têm o potencial de trazer maior satisfação aos usuários e de reduzir drasticamente o consumo de energia.

A Figura 7 indica os resultados de uma condição que pode ser utilizada em um sistema híbrido ou com ventilação extra, utilizando maior taxa de renovação de ar (em conjunto com um sistema DOAS, por exemplo) e menor carga do sistema de ar condicionado. Assim, com temperatura ambiente de 27 ºC, porém com velocidade do ar em 0,4 m/s é possível obter PMV= 0,15 e PPD= 5,0%. A redução do consumo de energia no sistema de ar condicionado será da ordem de 40%.

Figura 7 – Tela do *CBE Thermal Comfort Tool* com temperatura ambiente de 27 ºC e velocidade do ar de 0,4 m/s



Fonte: CENTER FOR THE BUILT ENVIRONMENT, 2016.

1.2.2 CARGA TÉRMICA PARA DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS

É muito comum utilizar-se como carga térmica de projeto, para dimensionamento dos equipamentos e componentes do sistema de ar condicionado, a relação tradicional de 20 m²/ton, ou seja, sem considerar qualquer outro parâmetro, a carga térmica é definida apenas em função da área condicionada, no caso, 20 m² de área condicionada equivale a 3.517 W (1 ton) de carga térmica ou 5,7 m²/kW.

É notório observar que a maioria dos sistemas de ar condicionado de edifícios no Brasil, desde os anos 90 e principalmente os mais novos, estão superdimensionados. Normalmente com 30% a 40% de folga, o que resulta em equipamentos operando em carga parcial mesmo no alto verão. No entanto, além desse superdimensionamento resultar em um custo de investimento inicial muito mais elevado, todo o sistema fica prejudicado, principalmente nas condições de baixa carga térmica. É comum encontrar instalações com um *Chiller* reserva no verão sem que o sistema tenha sido dimensionado para isso. Entretanto, o superdimensionamento dos elementos do circuito de distribuição de ar, incluindo os condicionadores de ar, pode prejudicar a operação e o conforto nos ambientes na época de baixa carga térmica.

Nos EUA, a "regra do dedão" é 400 ft²/ton (37 m²/ton ou 10,6 m²/kW). Em 2012 foi realizado um estudo comparativo sobre a evolução dos requisitos mínimos de eficiência energética do ***ASHRAE Standard 90.1***, desde sua versão inicial, em 1989, até a versão 2010. Foram adotados os requisitos mínimos de cada versão para todos os componentes de um edifício

comercial típico na cidade de Atlanta – GA, incluindo materiais de construção, cargas internas (iluminação, tomadas) e a evolução dos requisitos do ***ASHRAE Standard 62.1*** sobre a qualidade do ar interno no mesmo período. A Tabela 5 apresenta os resultados com o impacto na carga térmica.

Tabela 5 – Comparação entre valores de relação de área por carga térmica utilizando como parâmetros os requisitos mínimos de eficiência energética do ***ASHRAE Standard 90.1*** em diferentes versões

Ano	m²/ton	m²/kW
Típico nos anos 80	29	8,2
Versão 1989	35	10,0
Versão 1999	40	11,5
Versão 2010	62	17,7

Fonte: BRUNING, 2012.

No item 1.1 do Volume III, há um estudo comparativo entre sistemas considerando alguns valores típicos de relações de cargas, envolvendo os aspectos de eficiência energética e custo inicial de investimento.

1.3 REQUISITOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – VERSÃO I-P vs. SI

A partir das versões distintas do ***ANSI/AHRI Standard 550/590 (I-P)*** e do ***ANSI/AHRI Standard 551/591 (SI)***, como já abordado no item 5.2 do Volume I, o ***ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1*** também passou a ter diferentes valores de requisitos mínimos de eficiência energética para os *Chillers*, entre a versão I-P e a versão SI. No Brasil é mais comum utilizar como referência para os projetos de ar condicionado as condições de operação do ANSI/***AHRI Standard 550/590 (I-P)***. Porém, a partir da versão 2017 do Programa Brasileiro de Etiquetagem para Edifícios – PBE Edifica, são utilizadas as condições de operação de referência do ***ANSI/AHRI Standard 551/591 (SI)***.

O impacto dessa diferença é pequeno, porém pode gerar algumas divergências durante o a fase de projeto entre o engenheiro consultor (projetista) e os fabricantes dos *Chillers*. A Tabela 6 mostra uma comparação entre os valores de eficiência energética mínima requerida para *Chillers* (COP a 100% e IPLV) entre a versão I-P (com unidades convertidas) e a versão SI do ***ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2016***, considerando a alternativa 2 (*Path* B) da tabela 6.8.1-3 desta norma.

Tabela 6 – Comparação entre os requisitos mínimos de eficiência energética para vários tipos de *Chillers*, estabelecidos pelo ***ASHRAE Standard 90.1-2016, versão I-P vs. versão SI***

Tipo de Equipamento		Eficiência Energética Mínima Requerida Alternativa 2 (Path B)			
	ASHRAE Standard 90.1	*Versão 2016 – I-P*		*Versão 2016 - SI*	
	Faixa de Capacidade	COP (100%)	IPLV	COP (100%)	IPLV
Condensação a Ar (com condensador incluso)	< 528 kW	2.843	4.633	2,866	4,669
	≥ 528 kW	2.843	4.718	2,866	4,758
Condensação a Água (compressor do tipo alternativo, parafuso ou *scroll*)	< 264 kW	4.509	7.034	4,513	7,041
	≥ 264 kW e < 528 kW	4.689	7.177	4,694	7,184

(continua)

Tipo de Equipamento		Eficiência Energética Mínima Requerida Alternativa 2 (Path B)			
	ASHRAE Standard 90.1	*Versão 2016 – I-P*		*Versão 2016 - SI*	
	Faixa de Capacidade	COP (100%)	IPLV	COP (100%)	IPLV
Condensação a Água (compressor do tipo alternativo, parafuso ou *scroll*)	≥ 528 kW e 1.055 kW	5.172	7.993	5,177	8,001
	≥ 1.055 kW e < 2.110 kW	5.672	8.578	5,633	8,586
	≥ 2.110 kW	6.064	9.255	6,018	9,264
Condensação a Água (compressor centrífugo)	< 528	5.097	7.993	5,065	8,001
	≥ 528 kW e < 1.055 kW	5.582	8.792	5,544	8,801
	≥ 1.055kW e < 1.407 kW	5.961	9.018	5,917	9,027
	≥ 1.407 kW e < 2.110 kW	6.064	9.255	6,018	9,264
	≥ 2.110	6.064	9.255	6,018	9,264

Fonte: Elaboração do autor.

Nota:
*Apesar de não listados, os valores da Alternativa 1 (*Path* A) também diferem entre as duas versões.
Para os *Chillers* com ciclo de absorção, os valores requeridos são os mesmos nas duas versões.

Os valores indicados no **RTQ-C – REGULAMENTO TÉCNICO DA QUALIDADE PARA A CLASSE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES COMERCIAIS, DE SERVIÇOS E PÚBLICAS**, do PBE Edifica se referem à versão SI.

1.4 NOVAS REFERÊNCIAS PARA DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS

Considerando alguns aspectos dos itens anteriores e a busca pela otimização do projeto, começando por mudanças de referências tradicionais, é possível obter ganhos de eficiência energética consideráveis no sistema de água gelada, incluindo custo de investimento menor, e garantir o conforto térmico e um melhor controle das variáveis que impactam no conforto.

A Tabela 7 mostra uma comparação sobre os vários dados de referência, muitos deles "consagrados", mas que merecem ser desafiados com o objetivo da real otimização energética do sistema.

A seguir alguns comentários sobre os valores utilizados:

- Muitos dos valores da coluna "Novas Referências" servem apenas de sugestões, pois em cada projeto, com o uso das ferramentas de simulação, é possível aperfeiçoá-los. É importante lembrar que 0,5% de ganho sem nenhum investimento já é muito importante para o consumo de energia ao longo da vida útil do sistema.
- A temperatura de insuflação mais elevada terá como consequência o aumento da umidade relativa, mas isso não traz impacto significativo no conforto térmico. Os brasileiros estão acos-

Tabela 7 – Comparação entre valores de referências tradicionais adotadas em projetos de sistemas de água gelada e novas referências, com vistas a otimização energética

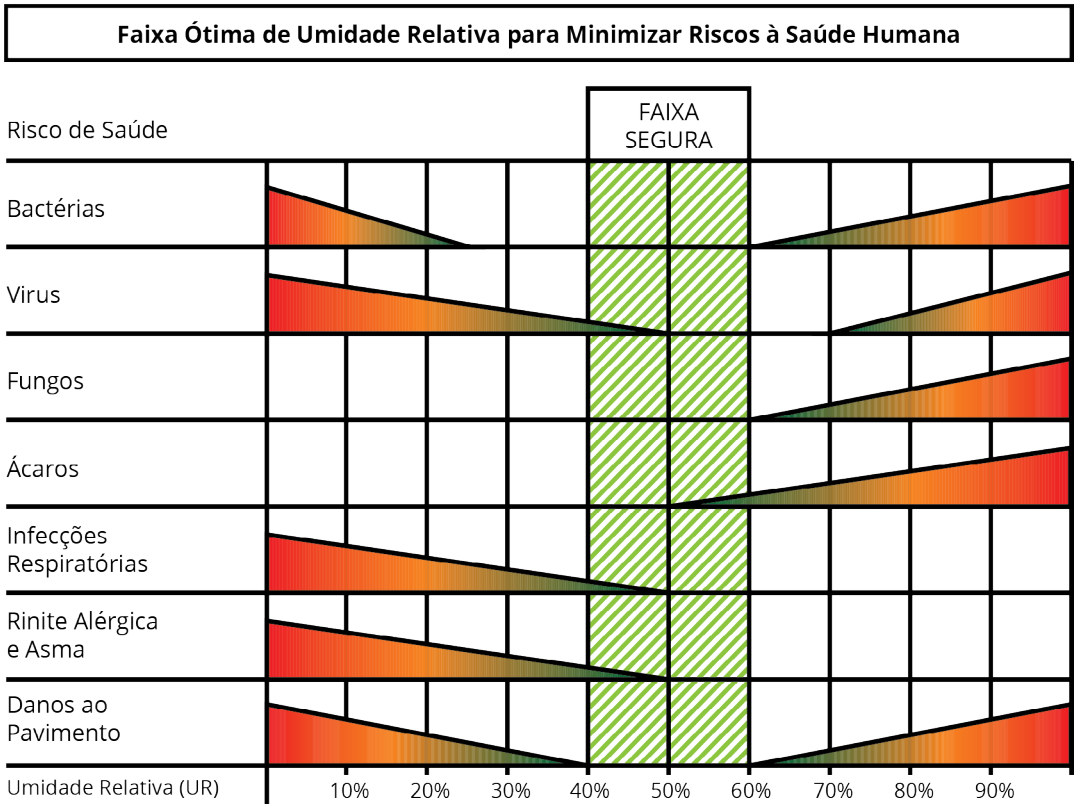
		Referências Tradicionais	Novas Referências
Setpoint Ambiente	°C	24,0 °C (1,0 clo)	PMV/ PPD Ref.: 25,0 °C (0,61 clo)
Umidade Relativa	%	50%	55%
Temperatura de Insuflação	°C	11,0 °C a 13,0 °C	13,0 °C a 15,0 °C
Temperatura de Água Gelada	°C	12,2 °C → 6,7 °C	15,5 °C → 7,5 °C
Vazão de Água Gelada	L/s/kW	0,04305 (2,4 gpm/ton)	0,0300 (1,67 gpm/ton)
Temperatura de Entrada de Água de Resfriamento	°C	29,5 °C	Máx.$T_{BU\text{-}ASHRAE\text{-}Ref}$ + 3,5 °C
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar Externo	°C	24,0 °C (São Paulo)	Máx.$T_{BU\text{-}ASHRAE\text{-}Ref}$ = 0,4% (São Paulo= 23,2 °C)
Vazão de Água de Resfriamento	L/s/kW	0,05382 (3,0 gpm/ton)	0,0400 (2,23 gpm/ton)
Altura Manométrica BAGPs	m.c.a.	25	0
Altura Manométrica BAGSs	m.c.a.	35 a 40	BAGMs → Cálculo (Real Típico: 21 a 25 m.c.a.)
Altura Manométrica BACs	m.c.a.	25 a 30	Cálculo (Real Típico: 15 a 19 m.c.a.)

Fonte: Elaboração do autor.

tumados e toleram umidade relativa mais elevada. Uma alteração de 10% na umidade relativa aumenta o PMV em cerca de 0,07 e não altera o valor do PPD. O limite superior recomendado pela ASHRAE é de 60%. A Figura 8 indica a melhor faixa de umidade relativa no ambiente para minimizar efeitos adversos à saúde.

- Com a temperatura de insuflação mais elevada, é possível ajustar o *setpoint* de saída de água gelada dos *Chillers* para 7,5 °C (ou até 8,0). Isso também facilita a adoção da vazão de água gelada menor (0,0300 L/s/kW), com diferencial de temperatura de água gelada entre 7,0 °C e 8,0 °C.
- Na coluna de novas referências, sugere-se eliminar o uso de sistemas com circuitos primário e secundário de água gelada (eliminar as BAGPs) e adotar o conceito de circuito único com vazão variável de água gelada, conforme apresentado no item 8.5 do Volume I. As bombas de água gelada principais (BAGMs) são dimensionadas para atender aos equipamentos usuários (ex. *Fan Coils*) em série com os *Chillers*.
- Em sistemas com condensação a água, o trio clássico de temperaturas do circuito de rejeição de calor, $T_{BU\text{-}AR}$= 24,0 °C/ $T_{ENT\text{-}AG.RESF}$= 29,5 °C/ $T_{SAI\text{-}AG.RESF}$= 35,0 °C (do sistema I-P – 75 °F/ 85 °F/ 95 °F), precisa ser desmistificado. O dimensionamento otimizado das torres de resfriamento em conjunto com os *Chillers* e as bombas de água de resfriamento, pode reduzir em mais de 10% o consumo de energia total da CAG, além de reduzir (em pequena proporção – cerca de 2%) o consumo de água nas torres de resfriamento.

Figura 8 – Faixa de umidade relativa do ar para minimizar riscos à saúde humana



Fonte: STERLING, 1986.

Deve-se observar apenas que não se pode diminuir a vazão de água de resfriamento sem a diminuição da temperatura de entrada de água de resfriamento nos condensadores dos *Chillers*. Observe que aqui se propõe uma redução do *approach* na saída das torres de 5,5 ºC para 3,5 ºC. De outra forma, com o aumento da temperatura de saída de água de resfriamento nos condensadores dos *Chillers*, haverá um aumento na pressão de descarga dos compressores e aumento no consumo de energia dos *Chillers*.

- A altura manométrica final das bombas de água gelada e de água de resfriamento deve ser calculada, em função do encaminhamento real, a ser definido no projeto executivo, durante a fase de construção (responsabilidade do instalador, a ser verificada pela autoridade de comissionamento). Porém, durante a fase de projeto, esses valores também devem ser previamente calculados. Os valores tradicionais adotados no projeto básico nunca são alterados no projeto real. No mundo real, a altura manométrica das bombas são bem menores que os valores típicos "adotados" no projeto e nunca revisto pelos instaladores. Muitas vezes, devido aos excessos, durante o balanceamento hidrônico, o que se faz é restringir muito as válvulas de balanceamento (dos *Chillers*, torres de resfriamento e condicionadores de ar) e como resultados, de forma que em cada circuito, a altura manométrica atinja o valor do projeto inicial, ou seja, superdimensionado.

A Tabela 8 apresenta os resultados do dimensionamento de um sistema de água gelada com condensação a água, utilizando as referências tradicionais – S1. A Tabela 9 mostra os resultados do sistema utilizando as novas referências – S2.

Os resultados apresentados nas Tabelas 8 e 9 foram obtidos da seguinte forma:

- O COP adotado para os *Chillers* do sistema **S1** foi o valor do requisito mínimo de eficiência ener-

Tabela 8 – Resultados do dimensionamento do sistema de água gelada **S1**, utilizando as referências tradicionais

Capacidade Total: 4.571 kW (1.300 ton)			
Equipamento	Potência (kW)	COP	%W
Chillers	760	6,018	61,3
BAGPs	65	62,50	5,3
BAGSs	83	48,95	6,7
BACs	95	42,76	7,7
Torres (Ventiladores)	33	123,1	2,7
Fan Coils (Ventiladores)	173	23,46	14,0
Ar Externo (Ventiladores)	30	135,4	2,4
Total	**1.239**	**3,691**	**100**
Consumo de Energia Anual Estimado: 2,3632 MWh			

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 9 – Resultados do dimensionamento de um sistema de água gelada **S2**, utilizando novas referências

Capacidade Total: 4.160 kW (1.183 ton)			
Equipamento	Potência (kW)	COP	%W
Chillers	642	6,479	69,8
BAGPs	0	0	0
BAGSs	46	99,37	5,0
BACs	35	130,6	3,8
Torres (Ventiladores)	33	138,5	3,6
Fan Coils (Ventiladores)	133	30,50	14,5
Ar Externo (Ventiladores)	30	135,4	3,3
Total	919	4,525	100,0
Consumo de Energia Anual Estimado: 1.753 MWh			
Redução da Potência Total Instalada: 320 kW			
Redução do Consumo de Energia Anual: 610 MWh (26%)			

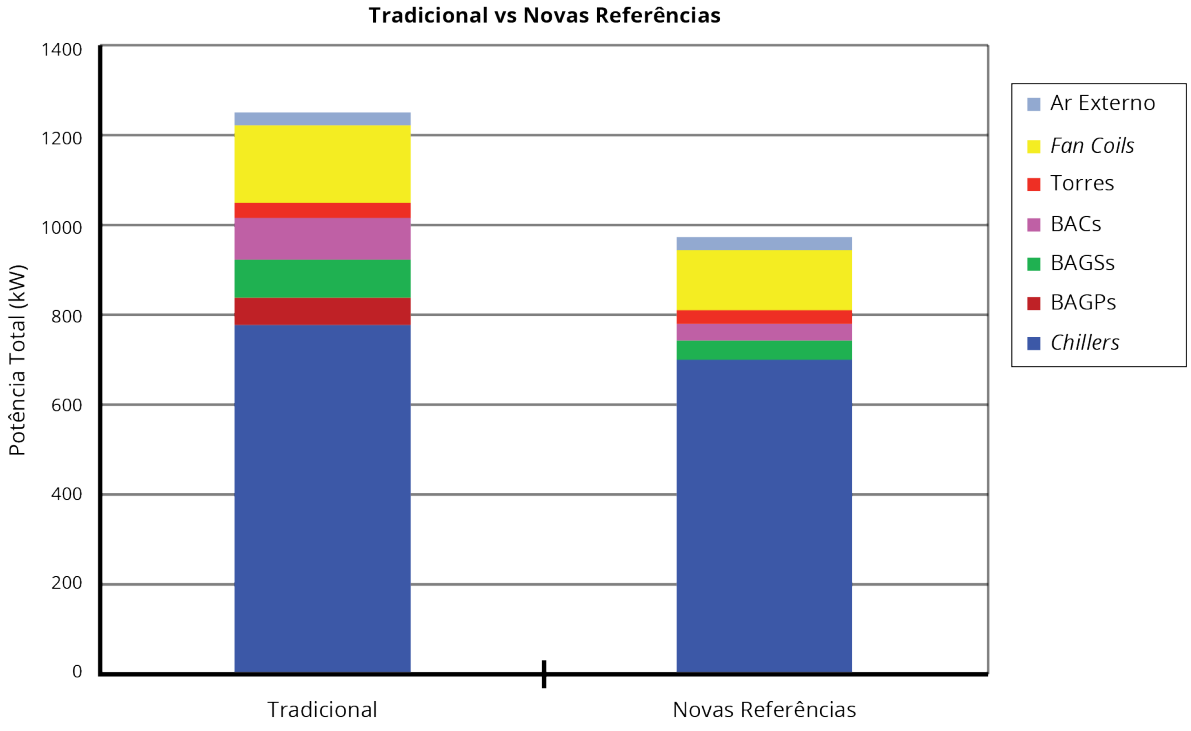
Fonte: Elaboração do autor.

gética do **ASHRAE Standard 90.1-2016 SI – *Path B*** para as condições padrão do ***AHRI Standard 551/591 SI***;

- Para o COP dos *Chillers* do sistema **S2**, foi utilizado apenas o cálculo da correção do COP, a partir do valor do requisito mínimo de eficiência energética, considerando as condições de operação do circuito de água gelada e do circuito de água de resfriamento para o projeto com novas referências, conforme indicado na Tabela 7. Quando as condições de operação de projeto dos *Chillers* forem diferentes do padrão do ***AHRI Standard 551/591 SI***, é necessário realizar um cálculo de correção sobre o valor do requisito mínimo de eficiência energética apresentado na Tabela 6.8.1-3 do ***ASHRAE Standard 90.1-2016 SI***, conforme descrito no item 6.4.1.2.1 desta norma;
- A carga térmica de projeto do sistema **S2** é menor devido apenas à adoção de valores diferentes de temperatura, umidade relativa do ar nos ambientes climatizados e do índice de vestimenta (clo) dos usuários, conforme indicado na Tabela 7. Os *Chillers* dos dois sistemas foram dimensionados para atender exatamente a carga térmica de projeto;
- Para o sistema **S1**, foi adotado um sistema de água gelada com circuito primário e secundário e o para o sistema **S2** foi adotado um sistema de circuito único com vazão variável de água gelada (por isso a potência das BAGPs é igual a zero).
- As diferenças de potência de bombas são resultantes dos valores de vazão e altura manométrica calculados, a partir das referências da Tabela 7. Foram consideradas as mesmas torres de resfriamento para os dois sistemas.
- A redução das potências dos ventiladores dos condicionadores de ar e da renovação de ar externo são resultantes dos valores adotados para as condições ambientes, a partir das referências da Tabela 7.

O Gráfico 2 mostra uma comparação dos resultados de potência total instalada entre os dois sistemas analisados.

Gráfico 2 – Comparativo entre os resultados de potência total no dimensionamento de um sistema de água gelada utilizando as referências tradicionais e as novas



Fonte: Elaboração do autor.



2 NOVAS CONCEPÇÕES DE SISTEMA DE AR CONDICIONADO E SISTEMAS DE ÁGUA GELADA

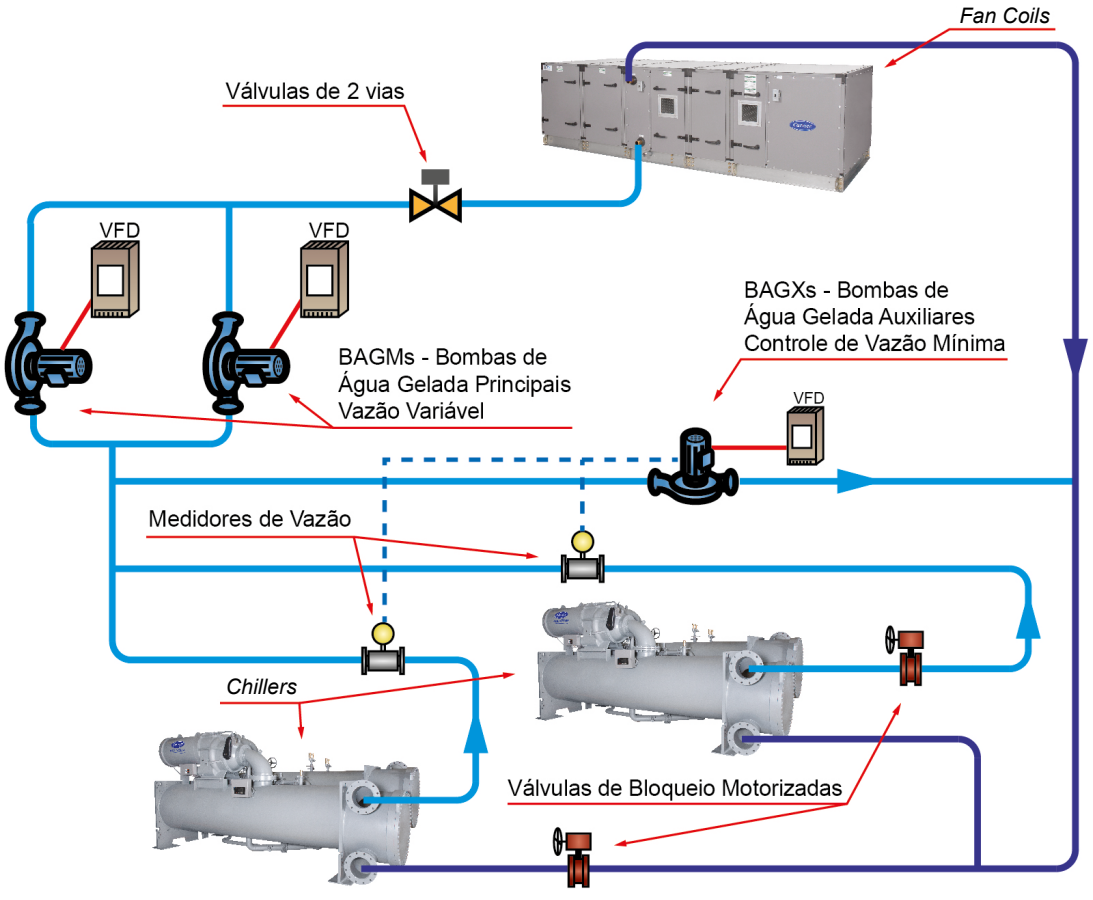
2.1 SISTEMA DE CIRCUITO ÚNICO COM VAZÃO VARIÁVEL DE ÁGUA GELADA

Edifícios existentes com circuito primário e secundário de água gelada normalmente operam com vazão excessiva no circuito secundário, que é uma das principais causas do efeito chamado "Síndrome de Baixo ΔT" (baixo diferencial de temperatura de água gelada no sistema – ver item 5.3).

Esse problema diminui a controlabilidade do sistema de ar condicionado, além de provocar o aumento do consumo de energia no sistema. Além disso, muitas vezes é necessário operar uma quantidade maior de *Chillers* e/ou mais bombas do que o necessário para diminuir esse efeito, o que resulta em consumo de energia ainda maior no sistema.

A alteração de um sistema com circuito primário e secundário para um sistema com circuito único com vazão variável de água gelada diminui a Síndrome de Baixo ΔT e melhora sensivelmente o desempenho de todo sistema de água gelada. A Figura 9 ilustra um sistema circuito único com vazão variável de água gelada.

Figura 9 – Fluxograma esquemático de um sistema com circuito único de água gelada com vazão variável e bombas auxiliares de vazão mínima



Fonte: Elaboração do autor com fotos dos equipamentos de cortesia da Midea Carrier do Brasil Ltda.

De modo geral, as BAGSs são superdimensionadas com altura manométrica elevada. Isto permite a aplicação direta do sistema único com a eliminação das BAGPs e o aproveitamento das BAGSs, que passam a atender os condicionadores de ar em série com os *Chillers*. Como já descrito, será necessário instalar bombas auxiliares para o funcionamento apenas nas condições de operação com vazão mínima nos *Chillers*.

A aplicação de circuito único com vazão variável em sistemas existentes tem se mostrado muito efetiva, com resultados sensíveis de melhoria do controle operacional e de redução de consumo de energia superior a 20% em sistemas com Síndrome de Baixo ΔT.

2.2 SISTEMA DE CIRCUITO ÚNICO COM VAZÃO VARIÁVEL DE ÁGUA GELADA COM CHILLERS EM SÉRIE

Com a aplicação do sistema de água gelada com circuito único variável, fica muito fácil a associação dos *Chillers* em série. A configuração com *Chillers* em série pode ainda incluir a adaptação do circuito de água de resfriamento para se obter também este circuito em série, em contra fluxo com o circuito de água gelada como indica a Figura 10.

Essa aplicação pode resultar em um ganho extra de eficiência da ordem de 15% no sistema de água gelada (além do ganho com a utilização do circuito único variável).

No entanto, a implantação deste sistema requer um aumento no diferencial de temperatura de água gelada dos *Chillers*, tipicamente de 5,5 ºC, para um diferencial entre 9,0 ºC e 11,0 ºC. Essa alteração deve ser analisada com cuidado, principalmente sobre o desempenho dos condicionadores de ar existentes. Sistemas com fancoletes ou cassetes hidrônicos não conseguem operar com um diferencial de temperatura elevado. Caso a carga térmica total desses equipamentos, em um determinado sistema, seja maior que 30% da carga térmica total do sistema de ar condicionado, recomenda-se não utilizar o conceito de *Chillers* em série. Porém a melhor solução será a substituição desses condicionadores menores, que provavelmente não atendem os requisitos de filtragem do ar e nem promovem uma distribuição adequada de ar no ambiente.

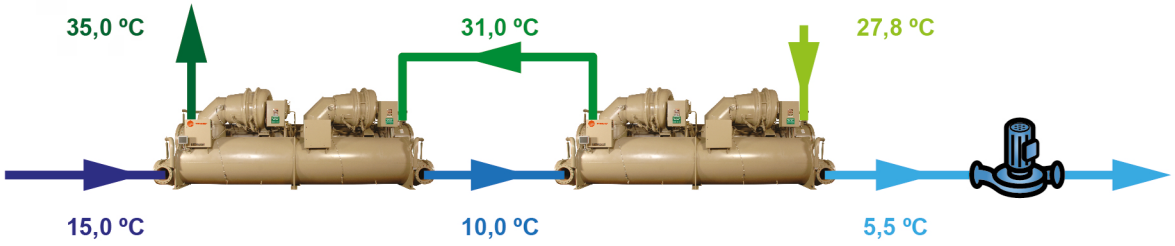
No caso de condicionadores do tipo *Fan Coil*, normalmente devido ao superdimensionamento desses equipamentos em sistemas existentes (típico de 30%), é bem possível que não haja necessidade de substituição desses equipamentos. Eventualmente será necessário substituir apenas as válvulas de controle de água gelada, para um tamanho menor, devido à redução de vazão em cada condicionador de ar.

2.3 SISTEMA DEDICADO PARA RESFRIAMENTO DE AR EXTERNO

O sistema dedicado para resfriamento do ar externo – DOAS (do inglês, *Dedicated Outdoor Air System*) nada mais é que um condicionador de ar dedicado para o resfriamento e desumidificação da parcela de ar externo (de renovação), com possível aplicação em edifícios com sistema central de ventilação para insuflamento de ar externo nos pavimentos.

O maior benefício da aplicação do DOAS é na melhoria da qualidade do ar nos ambientes climatizados. O ar externo é totalmente tratado no DOAS, com um nível de filtragem muito melhor seguindo

Figura 10 – Fluxograma esquemático de um sistema com circuito único de água gelada com vazão variável com a associação de *Chillers* em série em contrafluxo entre os circuitos de água gelada e água de resfriamento



Fonte: Elaboração do autor com fotos dos equipamentos de cortesia da Trane - Ingersoll Rand do Brasil Ltda.

para os condicionadores dos pavimentos com umidade absoluta bem baixa, o que permite a operação seca das serpentinas desses equipamentos.

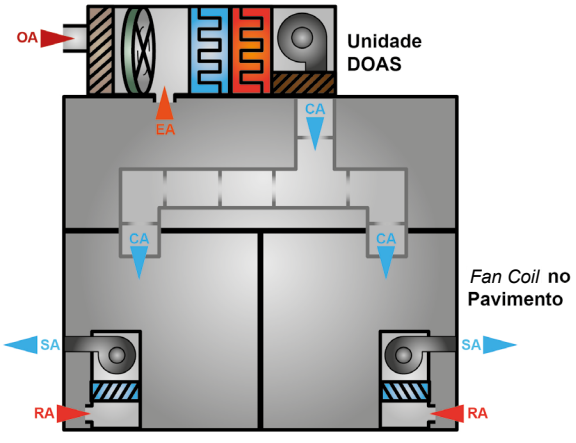
Além disso, a aplicação do DOAS traz um ganho de eficiência no sistema de água gelada em relação ao sistema tradicional de água gelada, pois permite que os condicionadores de ar existentes, que atendem os pavimentos, passem a operar com redução da carga total e redução substancial da parcela de desumidificação do ar.

O circuito existente poderá operar com temperatura de alimentação de água gelada mais elevada (em torno de 10 ºC) devido à redução da carga de desumidificação do ar e da folga de área nos condicionadores de ar dos pavimentos, resultante da diminuição da carga térmica.

A parcela de calor sensível representa cerca de 75% da carga térmica total. Com o aumento da temperatura de saída de água gelada nos *Chillers* do circuito principal, há um ganho de eficiência neste circuito superior a 18% e um ganho total no sistema de água gelada entre 10% e 15%.

Com a alteração do *setpoint* da temperatura de saída de água gelada dos *Chillers* do sistema principal, será necessário instalar um circuito de água gelada independente, para atender exclusivamente ao DOAS, com o(s) *Chiller(s)* operando com temperatura de saída de água gelada em torno de 5,0 °C. Essa carga representa cerca de 25% da carga térmica total.

Figura 11 – Esquema de um sistema dedicado para resfriamento de ar externo indicando o insuflamento de ar externo tratado para as casas de máquinas dos *Fan Coils* que atendem os ambientes condicionados



Fonte: Elaboração do autor.

Nesse conceito de operação do sistema de água gelada, é possível utilizar dois circuitos únicos com vazão variável de água gelada, com os *Chillers* associados em série, porém com a saída de água gelada do *Chiller* do primeiro estágio de resfriamento ligada a uma bomba dedicada a atender os condicionadores de ar dos pavimentos e a água gelada na saída do *Chiller* do segundo estágio ligada a uma bomba dedicada a atender o DOAS.

O DOAS pode requerer alterações de *layout* do sistema de distribuição de ar e a sua viabilidade em sistemas existentes depende muito da facilidade da instalação de uma rede de dutos dedicada. Em sistemas com insuflamento de ar externo central (não resfriado), onde já existe um *shaft* dutado, a aplicação do DOAS é muito mais fácil.

O uso de DOAS deveria ser obrigatório (pelo menos para atender os requisitos de conforto e qualidade do ar) em sistemas com condicionadores de ar de pequena capacidade, que normalmente utilizam serpentinas de poucas filas (três ou quatro *rows*), onde não é possível desumidificar o ar, e com ventiladores com pressão estática nos quais não é possível instalar um filtro de ar adequado aos requisitos da ***ABNT NBR 16401***.

Os exemplos típicos dos sistemas que necessitam obrigatoriamente de DOAS são as unidades evaporadoras de sistemas *Splits* e de sistemas VRF, e os condicionadores de ar com água gelada do tipo fancoletes e cassetes hidrônicos.

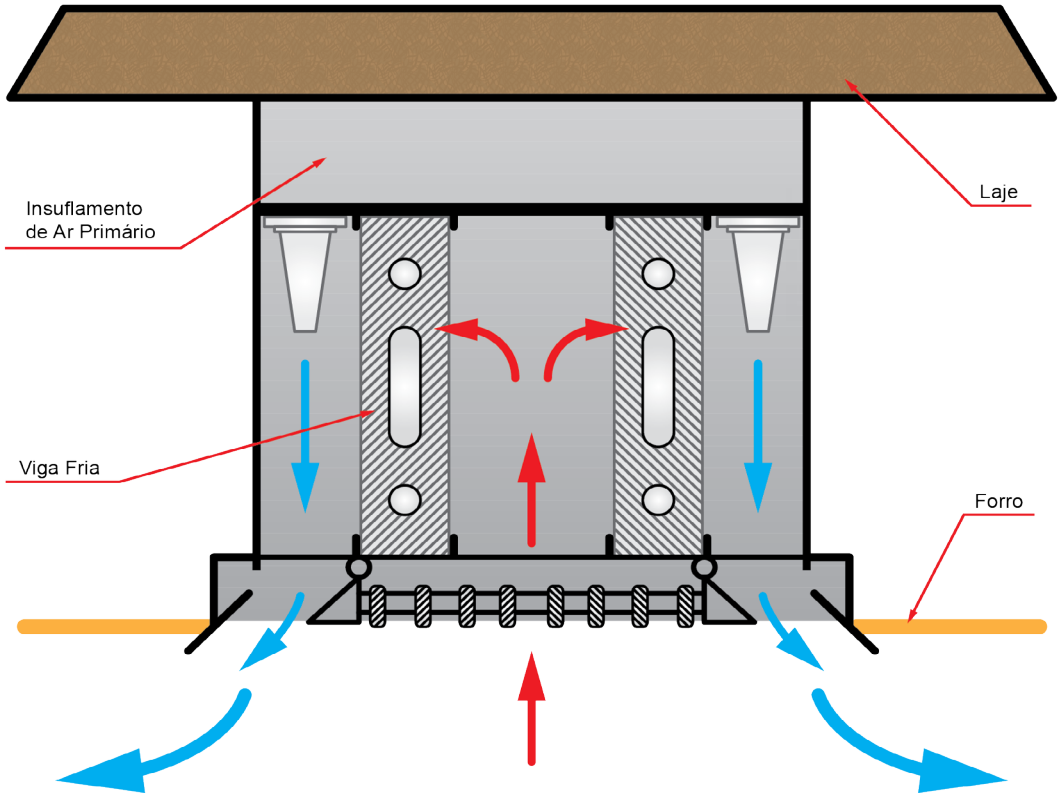
2.4 SISTEMAS COM VIGAS FRIAS

Vigas frias são dispositivos de resfriamento para retirada de calor sensível do ambiente, constituídos de serpentinas com circulação de água gelada, porém com temperatura acima do ponto de orvalho (*dew point*) do ar ambiente (em torno de 13 ºC). Em edifícios existentes com sistema do tipo VRF utilizando HCFC-22, essa é uma possível aplicação para viabilidade da implantação técnica com sistema de água gelada, sempre associadas a um sistema DOAS complementar, caso ainda não exista.

As principais vantagens da aplicação de vigas frias são:

- Menor vazão de ar;
- Rede de dutos mínima;
- Não há sistema de ventilação de recirculação nos ambientes (apenas o DOAS);

Figura 12 – Esquema de funcionamento de viga fria instalada no forro indicando o fluxo de ar insuflado pelas laterais e o ar de retorno pelo centro



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 13 – Ilustração de um sistema de viga fria instalada no forro indicando a tubulação de água gelada e o suprimento de ar primário (DOAS) desumidificado e tratado



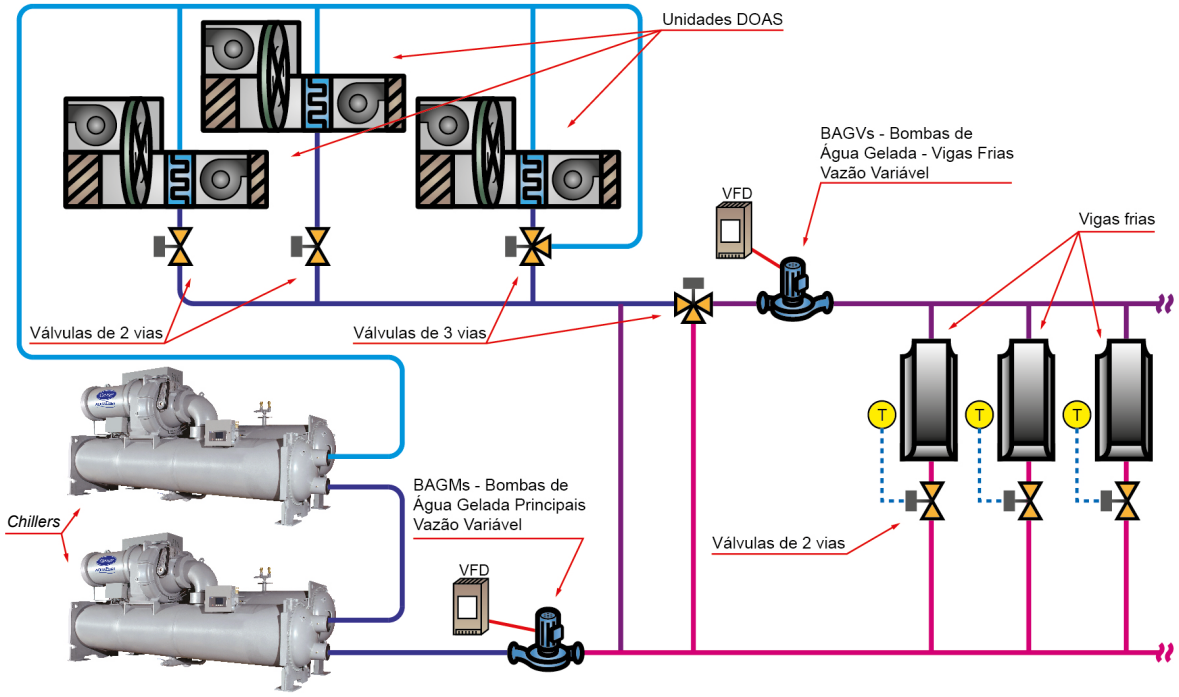
Fonte: Semco LLC – Fläkt Woods Company.

- Casas de máquinas menores. Em caso de DOAS central, não há casa de máquinas no pavimento;
- Melhor conforto ambiental devido à baixa velocidade do ar na zona condicionada.

Os sistemas com viga fria são aplicados em conjunto com o DOAS e permitem ganhos de eficiência acima de 30% quando comparados a sistemas tradicionais. A Figura 14 ilustra um sistema de água gelada com aplicação conjunta de vigas frias e DOAS, com associação de *Chillers* em série e circuito único com vazão variável de água gelada.

O conjunto de bombas para as vigas frias não se trata exatamente de um circuito secundário, mas de um circuito exclusivo, pois necessita trabalhar com temperatura de entrada de água gelada mais elevada (típico acima de 13 °C).

Figura 14 – Sistema de água gelada com aplicação conjunta de vigas frias e DOAS, com associação de *Chillers* em série e circuito único de vazão variável para o sistema DOAS.



Fonte: Elaboração do autor com fotos dos equipamentos de cortesia de Midea Carrier do Brasil Ltda.



3 PROCESSO DE COMISSIONAMENTO EM EDIFICAÇÕES

O processo de comissionamento apresentado nesta publicação está baseado na estrutura definida pelo ***ASHRAE Guideline 0-2013 – The Commissioning Process*** – e reflete muito a estrutura dos projetos de edificações realizados nos EUA, fruto das melhores práticas de engenharia nos últimos 20 anos. No Brasil, os projetos de edificações têm uma estrutura diferente, porém, em consequência da forte influência dos EUA sobre as disciplinas de arquitetura e engenharia no Brasil, potencializada pelos programas de certificação de edifícios chamados "sustentáveis", há uma tendência dos projetos no Brasil seguirem a mesma linha. Atualmente, as maiores dificuldades estão relacionadas com as etapas iniciais, principalmente na fase de concepção, na elaboração dos documentos primários e fundamentais para todo o projeto desde a concepção até a ocupação e operação do edifício.

O processo de comissionamento é definido pelo ***ASHRAE Guideline 0-2013*** como um:

> *"Processo de gestão da qualidade para a melhoria das entregas de um projeto. O processo concentra-se em verificar e documentar que a instalação e todos os seus sistemas e montagens são planejados, projetados, instalados, testados, operados e mantidos para atender aos Requisitos do Projeto do Proprietário". (ASHRAE, 2013, p.)*

Assim, os principais objetivos do processo de comissionamento são:

- Verificar e documentar a conformidade dos sistemas em todas as etapas do projeto;
- Entregar projetos de construção e edifícios que satisfaçam as necessidades do proprietário;
- Verificar se o pessoal de operação e manutenção e até os ocupantes estão devidamente treinados para operar e conviver naquele edifício;
- Manter o desempenho da instalação ao longo de seu ciclo de vida.

Para que o processo tenha sucesso, é essencial que o proprietário esteja comprometido com a visão do processo de comissionamento. Para isso, é necessário que a Autoridade de Comissionamento seja contratada desde a fase de concepção do projeto. É importante também que as equipes de projeto participem do processo de comissionamento e que as equipes de operação e manutenção sejam envolvidas desde o início.

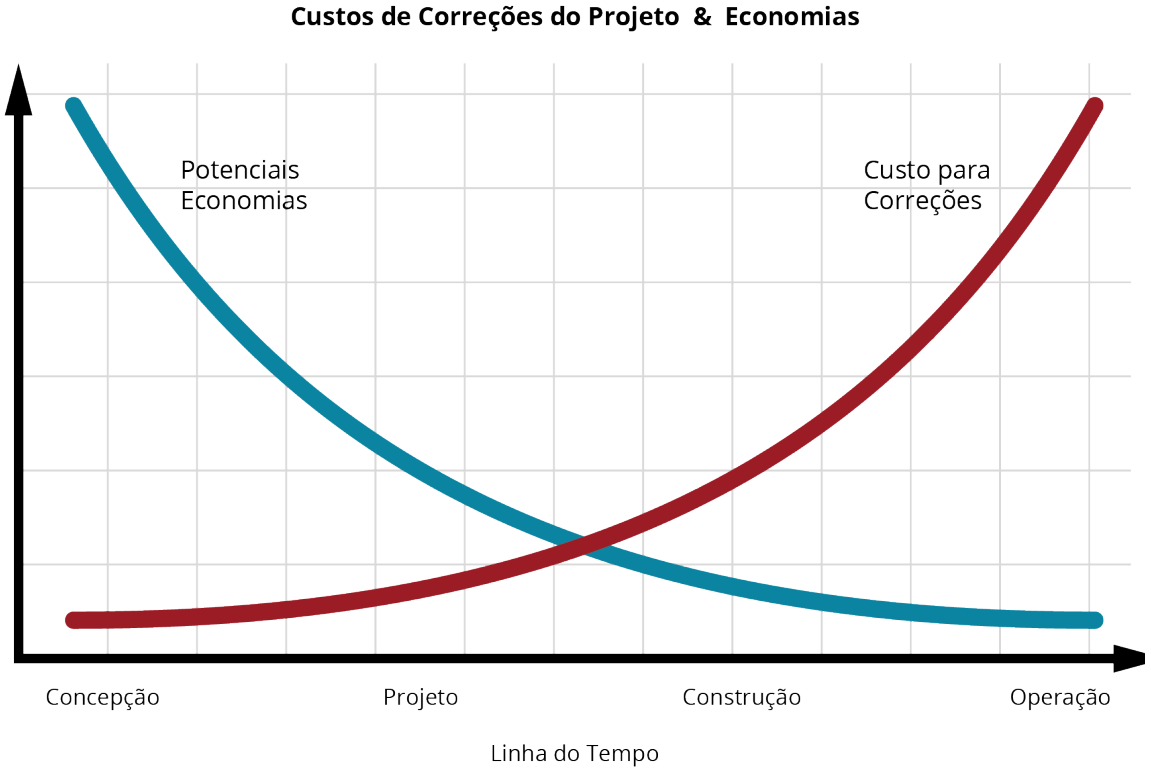
O Gráfico 3 mostra que o maior potencial de economias, com custos mínimos para correção, ocorre nas fases de concepção e projeto, e a Autoridade de comissionamento tem uma participação essencial nas atividades de desafiar as equipes de arquitetura e engenharia sobre as oportunidades de otimização dos sistemas. Por outro lado, as chances de melhorar um sistema, quando se descobre um problema durante os testes em campo na fase final da construção, são mínimas, pois muitas vezes os custos de correção e os prazos de execução tornam a solução inviável.

O comissionamento de sistemas permite a verificação de operação dos componentes sob várias condições e a interação entre sistemas e subsistemas (ex: CAG, condicionadores de ar, sistemas de distribuição de ar e o sistema de automação). Além disso, o processo de comissionamento documenta o desempenho dos sistemas para definir critérios e índices de desempenho (*benchmarks*) e capacita as equipes de operação e manutenção para operar adequadamente os sistemas com o foco nos requisitos de conforto dos usuários e de eficiência energética.

Assim, a rigor, o processo de comissionamento deve ter o seu início desde a fase de concepção e se estende por todo o projeto até a ocupação e operação do edifício.

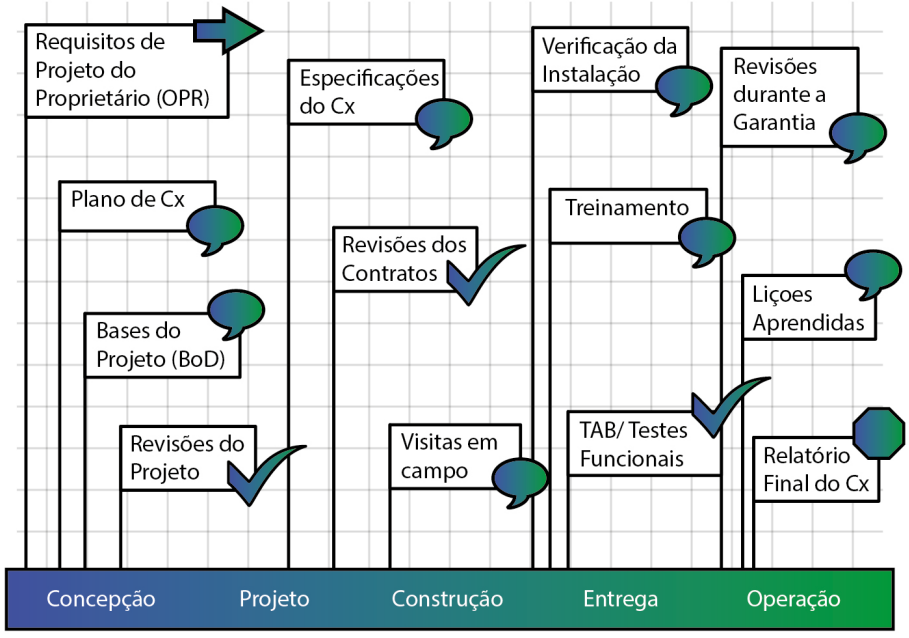
A Figura 15 mostra as principais atividades e documentos executados pelo processo de comissionamento.

Gráfico 3 – Curva de potencial de economias e curva de custo de correção em cada etapa de um projeto, desde a concepção até a operação



Fonte: PETERSON, 2007.

Figura 15 – Principais atividades do processo de comissionamento desde a concepção até a ocupação e operação do edifício



Fonte: RINDLISBAKER, 2013.

A seguir um descritivo das principais atividades do processo de comissionamento aplicado a edifícios.

3.1 FASE DE CONCEPÇÃO (PRÉ PROJETO

Desde o início do projeto, o comissionamento tem um papel fundamental. A Figura 16 mostra um fluxograma com as principais atividades durante a fase de concepção, quando são definidas as principais características arquitetônicas e os sistemas prediais. Nessa fase são elaborados o documento de Requisitos de Projeto do Proprietário – OPR (do inglês *Owner's Project Requirements*) e o Plano de Comissionamento (Plano de Cx), no qual serão estabelecidas as diretrizes de todo o projeto e do processo de comissionamento e servirão de base para a qualificação dos sistemas.

3.1.1 OPR – REQUISITOS DE PROJETO DO PROPRIETÁRIO

O OPR é o principal documento de todo o projeto, uma espécie de carta magna, na qual todos os requisitos do proprietário (que podem incluir os requisitos dos usuários e demais participantes do edifício ocupado) são estabelecidos, e que servirá de base para o desenvolvimento de todo o projeto.

A criação do OPR deve envolver os seguintes participantes:

- Representantes dos proprietários/usuários;
- Autoridade de Comissionamento;
- Consultores do projeto incluindo, pelo menos, as seguintes disciplinas:
  - Arquitetura;
  - Iluminação;
  - Ar condicionado;
  - Engenharia de *facilities* (engenharia de suporte à administração dos sistemas prediais ou do condomínio);
  - Engenharia de operação e manutenção.

O OPR, obviamente, deve ser gerado na concepção do projeto. De nada adianta ser criado após o desenvolvimento do projeto (isto é muito comum no Brasil, apenas como documento para os processos de certificação de edifícios "sustentáveis").

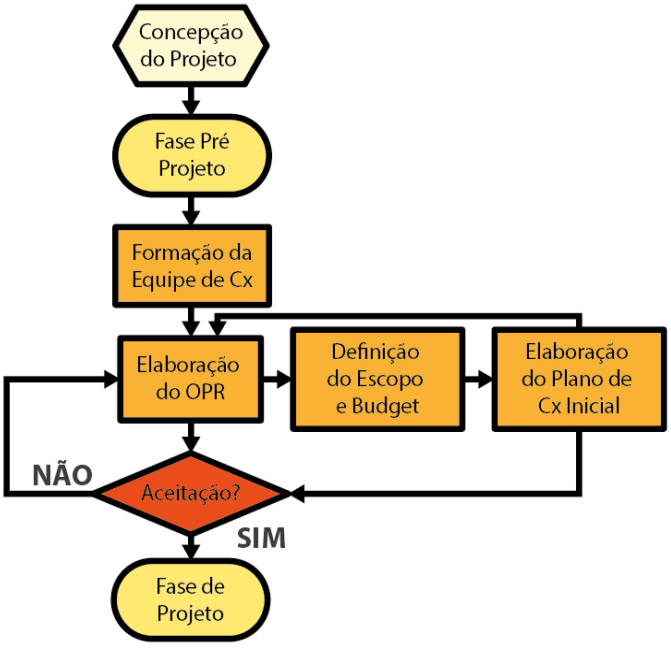
O OPR é um documento vivo e ativo, pois deve ser revisado e adequado ao longo de todo o projeto, até a ocupação. Deve ser claro e objetivo. Específico nos objetivos finais, mas não engessado. O detalhamento deve vir durante o BoD (do inglês, *Bases of Design* – documento de Bases do Projeto – ver item 3.2.1) a ser desenvolvido pelas equipes de arquitetura e engenharia.

Normalmente, a elaboração do OPR é coordenada pela Autoridade de Comissionamento, que é o responsável pelas equipes de comissionamento ao longo do projeto.

O OPR deve conter os seguintes itens:

1) Cronograma do projeto;
2) Orçamento do projeto;
3) Escopo do processo de comissionamento;
4) Requisitos da documentação de projeto;
5) Diretrizes do proprietário;

Figura 16 – Fluxograma das atividades de Cx durante a fase de concepção (pré-projeto)



Fonte: ASHRAE, 2013.

6) Restrições ou limitações ligadas ao local da instalação;

7) Requisitos do usuário;

8) Requisitos ocupacionais;

9) Requisitos de treinamento das equipes de operação e manutenção;

10) Requisitos de qualidade dos materiais de construção em função do custo de vida útil da edificação pré-definida;

11) Tolerâncias admissíveis para as variáveis operacionais;

12) Requisitos de flexibilidade de adaptação do sistema quanto a futuras ampliações ou alterações necessárias;

13) Requisitos de segurança operacional;

14) Funcionalidade da operação;

15) Requisitos de estética dos sistemas em harmonia com a arquitetura;

16) Requisitos do processo de construção;

17) Requisitos de comunicação;

18) Requisitos de controle.

19) Níveis de eficiência energética;

20) Níveis de sustentabilidade;

21) Requisitos de integração dos sistemas;

22) Normas e portarias aplicáveis;

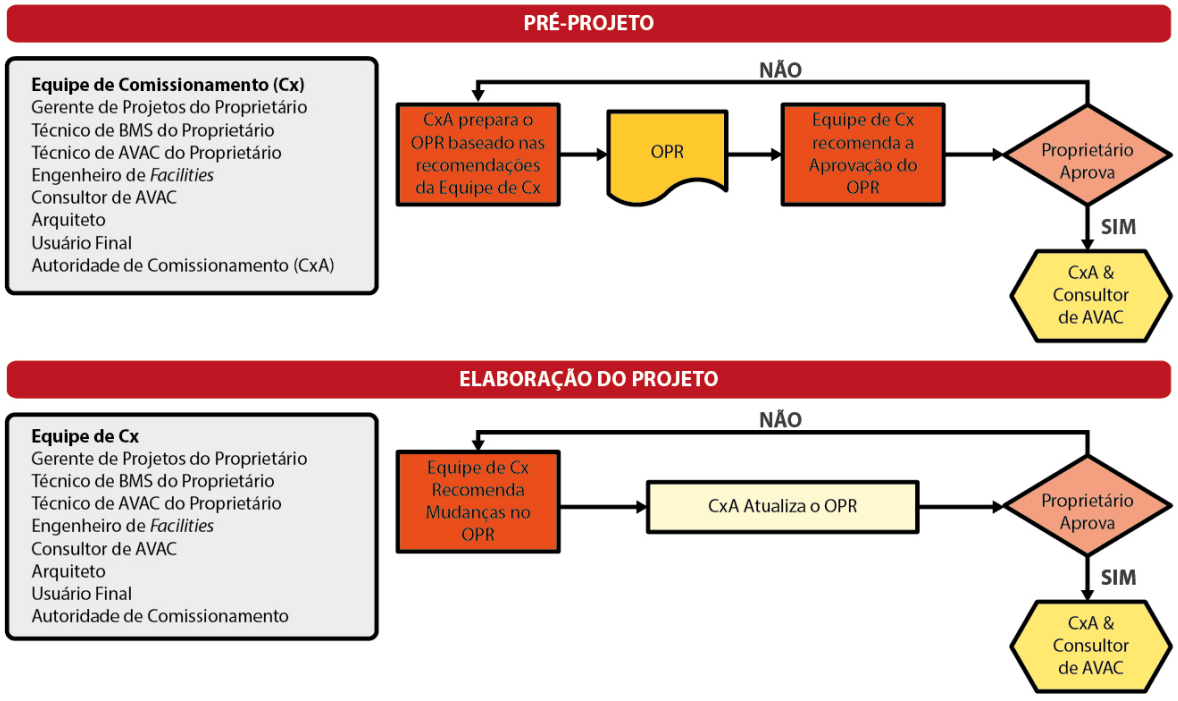
23) Requisitos de saúde e higiene do ambiente interno;

24) Requisitos de vibração e sísmicos;

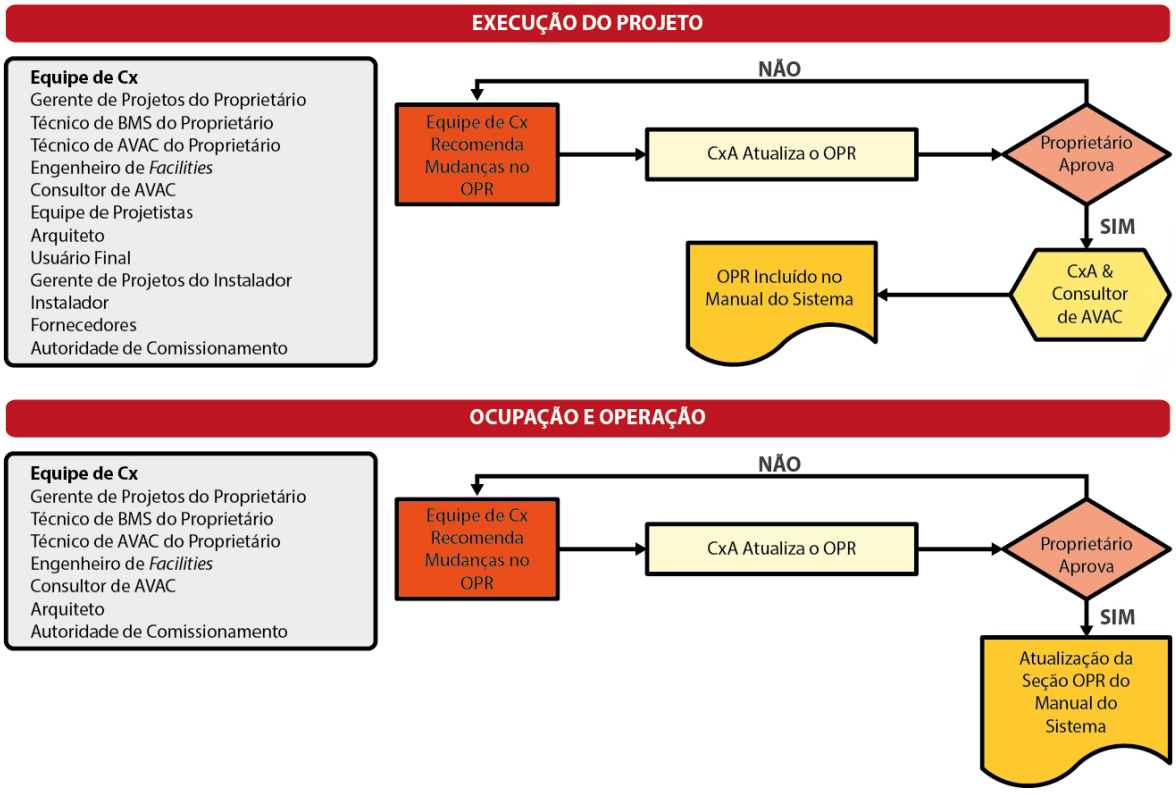
25) Requisitos de acessibilidade;

A Figura 17 mostra a evolução do OPR durante todas as fases do processo de comissionamento para um sistema de ar condicionado, desde sua elaboração na fase de concepção até a versão final que deverá ser incorporada ao manual dos sistemas e entregue para as equipes de operação e os representantes dos usuários.

Figura 17 – Fluxograma das atividades do OPR durante todo projeto



(continua)



Fonte: ASHRAE, 2007.

3.1.2 PLANO DE Cx – PLANO DE COMISSIONAMENTO

O Plano de Comissionamento identifica os processos e procedimentos necessários para que o processo de comissionamento seja bem-sucedido. O Plano de Comissionamento se refere totalmente ao OPR e reflete o escopo e orçamento definidos para o processo de comissionamento.

O Plano de Cx inclui um cronograma de atividades, a descrição detalhada das atividades do processo de comissionamento, responsabilidades dos envolvidos em cada etapa do projeto e da construção, requisitos de documentação, protocolos de comunicação, relatórios e procedimentos de avaliação. Os procedimentos de avaliação incluem a revisão e verificação do OPR, documentos de projeto, documentos do contrato, documentos da construção e procedimentos de teste.

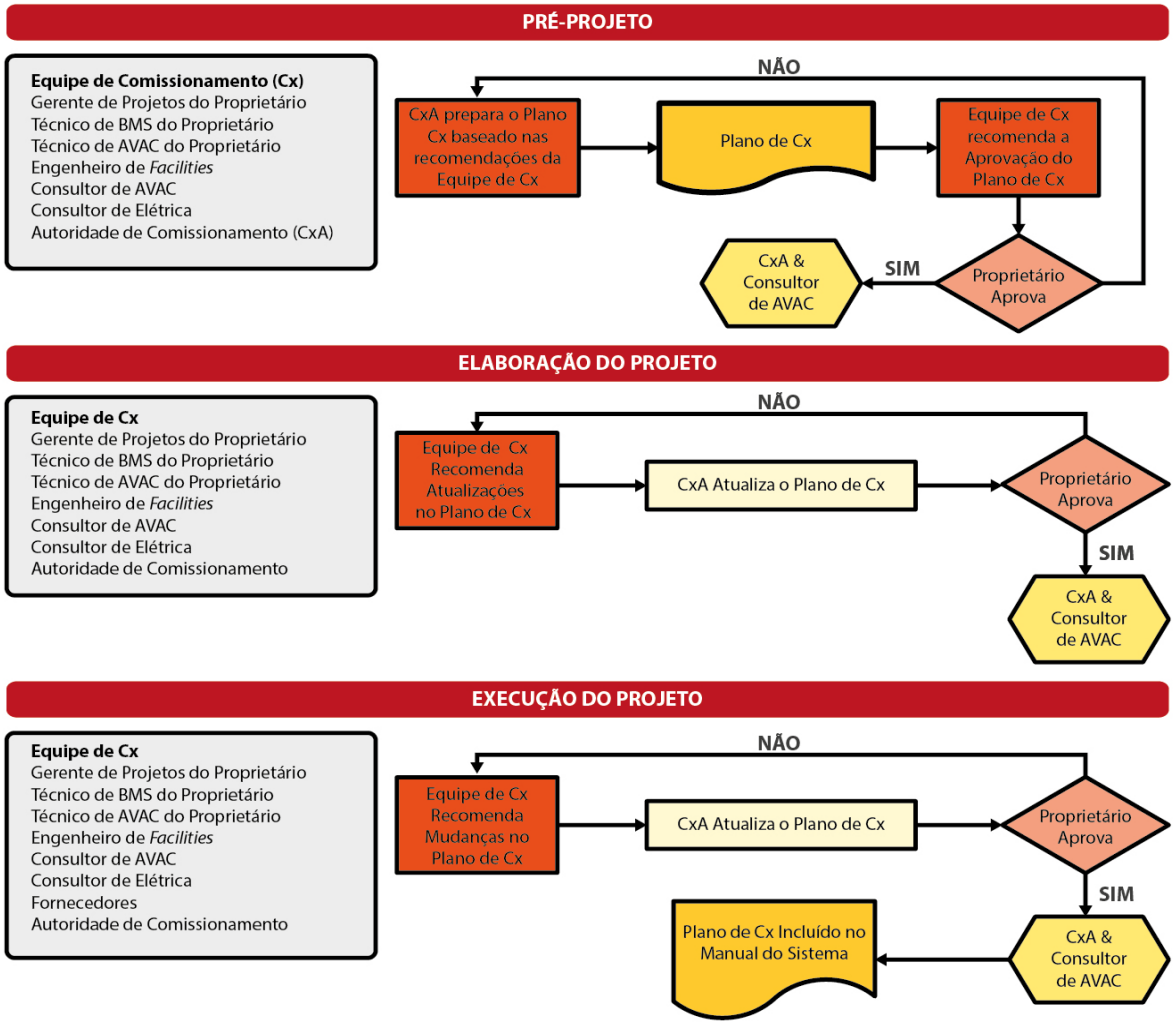
O Plano de Cx deve ser continuamente atualizado durante todo o processo, para refletir mudanças no planejamento, projeto, construção, ocupação e operações, aspectos que também serão atualizados no OPR e no BoD.

Durante a Fase de Concepção, o Plano de Cx trata principalmente do escopo do processo de comissionamento para a Fase de Projeto. As Fases de Construção e de Ocupação e Operação devem ser incluídas já desde o início do Plano de Cx, mas o detalhamento das atividades para essas fases é realizado durante a Fase de Projeto. A Figura 18 mostra a evolução do Plano de Cx durante todas as fases do processo de comissionamento para um sistema de ar condicionado.

3.2 FASE DE PROJETO

A fase de projeto pode ser considerada a mais crucial para a efetividade do comissionamento e para os resultados de desempenho que se esperam dos sistemas. Na Figura 19 é possível verificar que as atividades do processo de comissionamento irão contribuir substancialmente para o desenvolvimento do projeto, incluindo as revisões do projeto (com o foco no atendimento ao OPR) e a elaboração dos

Figura 18 – Fluxograma das atividades do Plano de Cx durante todo projeto



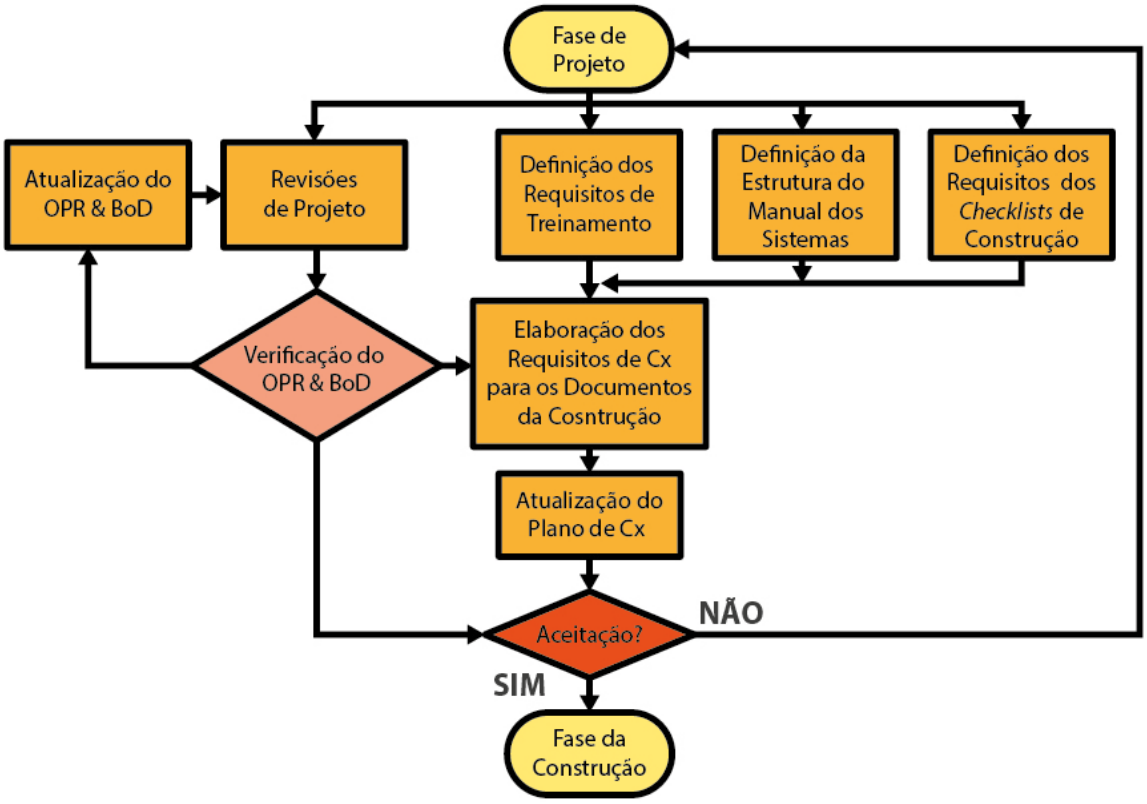
Fonte: ASHRAE, 2007.

requisitos de comissionamento para os documentos da construção, que inclui, ainda nessa fase, a definição das listas de verificação (*checklists*) da fase de construção, os requisitos de treinamento para as equipes de operação e manutenção, a estrutura do manual dos sistemas e toda especificação das atividades de TAB para a fase de construção, que deverão ser atualizadas no Plano de Cx.

Na fase de projeto, as atividades do processo de comissionamento incluem:

- Verificação da compatibilidade do BoD com o OPR;
- Atualização do Plano de Cx para incluir as atividades do comissionamento nas Fases de Construção e Ocupação e Operação;
- Desenvolvimento dos requisitos do processo de comissionamento para os documentos da construção, incluindo as atividades do comissionamento nas especificações técnicas para contratação de fornecedores;
- Elaboração de listas de verificação (*checklists*) para a fase de construção;
- Atualização do escopo e formato do manual dos sistemas;
- Definição dos requisitos de treinamento das equipes de operação e manutenção;
- Realização de revisão de projeto com foco no processo de comissionamento;

Figura 19 – Fluxograma das atividades de Cx durante a fase de projeto



Fonte: ASHRAE, 2013.

- Aceitação das atividades da fase de projeto do processo de comissionamento.

3.2.1 BoD – BASES DO PROJETO

O desenvolvimento do BoD tem como objetivo atender e cumprir os itens descritos no documento de OPR previamente elaborado, que estabelece todos os objetivos do cliente para o edifício em questão, incluindo os requisitos, as necessidades, limitações, diretrizes e mesmo os desejos do cliente para os vários aspectos relevantes do projeto.

Em suma, o BoD deverá ser o documento da equipe de projeto que reflete o OPR e, sempre que houver alterações na estrutura do OPR, o BoD deverá ser igualmente revisado para atender as alterações necessárias. Portanto, são documentos que continuamente serão revisados, com o BoD sempre refletindo o OPR, durante todo o projeto, até a fase de ocupação e operação.

Diferente dos memoriais descritivos dos projetos, o BoD é um documento que estabelece as principais diretrizes do projeto em relação ao OPR. Portanto, para cada sistema predial, esse documento deve ser elaborado a partir do respectivo memorial descritivo. Havendo alterações ou revisões do OPR e do BoD, os memoriais descritivos, além de toda documentação de projeto, também estarão sujeitos a revisões para atender as novas diretrizes. A seguir, algumas características do BoD:

- Deve ser desenvolvido no início do projeto;
- Deve ser revisado ao longo de todo processo para se adequar ao OPR;
- Deve ser bem detalhado para todos demais participantes do processo;
- Desenvolvido pelas equipes de projeto:
  - Arquitetura;
  - Iluminação;

- Ar Condicionado e Ventilação;
- Elétrica;
- Hidráulica;
- Civil;
- Automação.

O BoD deve conter os seguintes itens:

1) Descrição de cada opção de sistema considerada na fase de pré-projeto. Esse item se aplica basicamente ao sistema de ar condicionado e eventualmente aos sistemas de iluminação, hidráulico e a envoltória (arquitetura). Dentre as opções viáveis do sistema de ar condicionado para um projeto com sistema de água gelada deveriam ser consideradas as seguintes opções:
   - Tecnologias passivas (incluindo a concepção arquitetônica);
   - Sistemas associados (*free cooling*, vigas frias, insuflamento pelo piso, resfriamento dedicado do ar externo);
   - Termoacumulação de água gelada;
2) A definição final do sistema escolhido, indicando as razões pela preferência incluindo análise do custo de vida útil (LCC), eficiência energética, qualidade do ambiente interno, confiabilidade, facilidade de manutenção, definições específicas do proprietário em conformidade com o documento de OPR.
3) Premissas de cálculos, incluindo fatores de segurança, redundância, ocupação e utilização dos espaços internos (propostos e potenciais), taxas de ventilação, cargas elétricas, cargas de iluminação, densidade de potência, características dos dispositivos de sombreamento, isolamento térmico e transmissão de vapor, características da envoltória, fontes de poluição, requisitos de pressurização, tarifas de energia e demais utilidades;
4) Procedimentos analíticos e ferramentas de cálculos utilizados para a definição da concepção dos sistemas, incluindo *softwares* de análises (incluindo a versão utilizada), planilhas de cálculo, cálculos manuais, modelos de simulação (perdas de calor, carga térmica de resfriamento, pressurização e dimensionamento da rede de dutos, dimensionamento da tubulação, estratégias de controle e perfis de consumo de energia) e *softwares* de selecionamento dos fabricantes;
5) Condições ambientais incluindo condições de projeto do ar interno e do ar externo, assim como a qualidade do ar, pressurização entre salas, velocidade do fluxo de ar e requisitos acústicos;
6) Limitações do projeto, tais como zoneamento urbano, restrições locais, e restrições financeiras;
7) Premissas operacionais, incluindo as áreas de utilidades a serem utilizadas, horários de operação e ocupação, diversidades e particularidades operacionais do sistema, estimativas de custos anuais de operação e manutenção e capacitação operacional necessária;
8) Cálculos, incluindo dados de entrada e saída de *software* de simulação e modelagem ou cópias dos cálculos manuais, que demonstrem a evolução do projeto desde as premissas até a definição dos sistemas;
9) Descritivo dos sistemas identificando de que forma o projeto irá cumprir o OPR e de que forma o OPR é mais detalhado à medida que o projeto evolui. O descritivo deve incluir os sistemas, equipamentos e os modos de operação;
10) Descrição detalhada das sequências de operação e lógicas de controle dos sistemas;
11) Normas e legislação específicas aplicadas no desenvolvimento do projeto. Para cada sistema predial, deverão ser relacionadas todas as normas, procedimentos e legislação aplicável, utilizadas na execução do projeto e as que deverão ser requeridas para a construção. As normas listadas deverão conter a entidade normativa (ex: ABNT), o número de referência da norma (ex: NBR 16401), a data da publicação (ex: 2008) e o título descrito (ex: Instalações de Ar Condicionado – Sistemas Centrais e Unitários – Partes 1/2/3);
12) Diretrizes e normas do proprietário que influenciam o desenvolvimento do projeto;
13) Demonstração do atendimento aos requisitos do OPR, incluindo a apresentação de uma matriz (ou planilha) que identifique de que maneira os itens do OPR serão atendidos pelo projeto e como eles estão identificados nos documentos de construção.

A Tabela 10 apresenta uma planilha típica que identifica onde é necessário aplicar cada um dos itens do BoD nos principais sistemas prediais de um edifício.

Tabela 10 – Aplicabilidade de cada um dos itens do BoD nos principais sistemas prediais

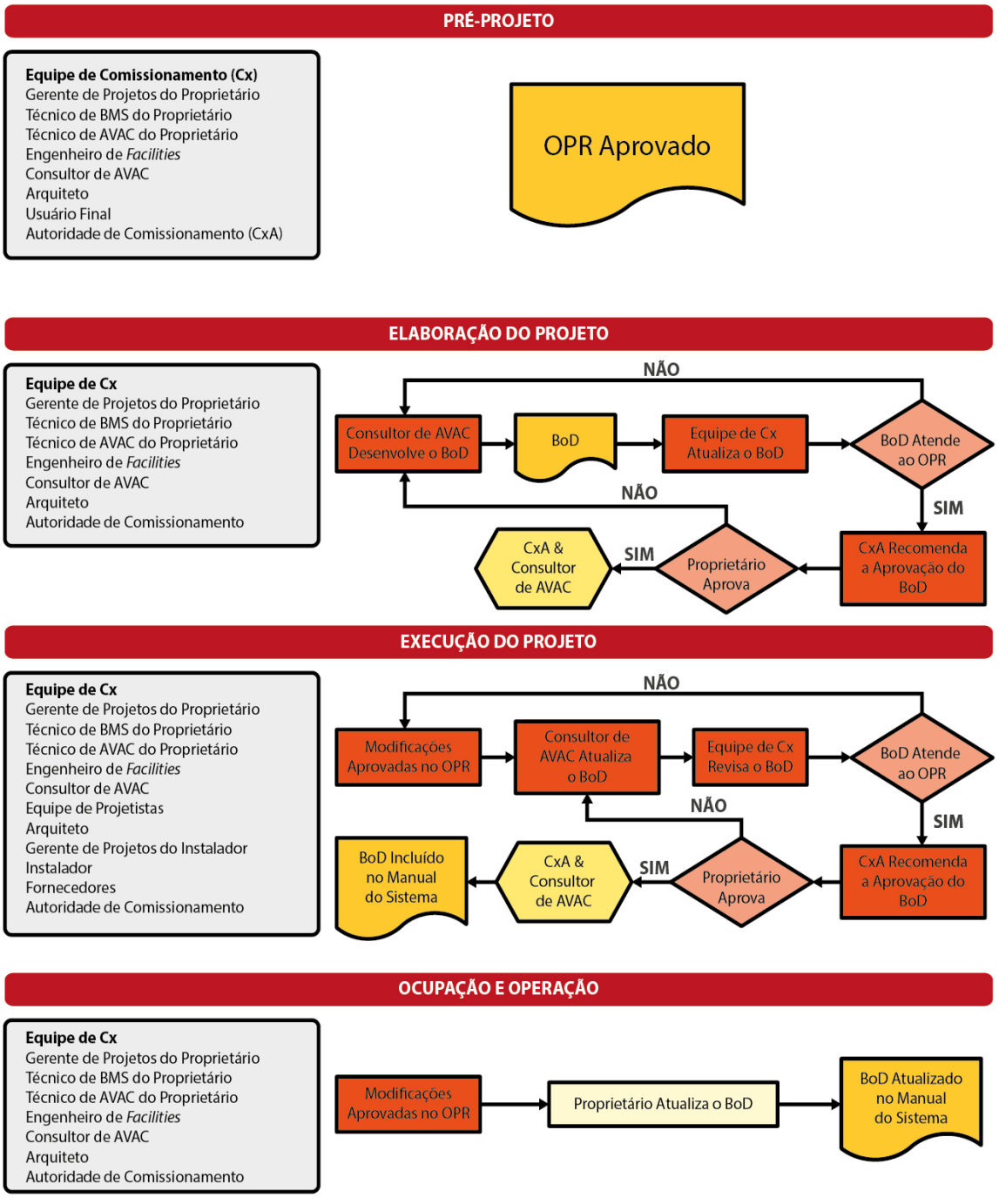
Item	Descrição	Envoltória	HVAC	Hidráulica	Iluminação	Automação
1	Descrição de cada opção de sistema considerada na fase de pré-projeto	X	X	X	X	---
2	A definição final do sistema escolhido	X	X	X	X	X
2.1	Análise de custo de vida útil (LCC)	X	X	X	X	---
2.2	Eficiência energética	X	X	---	X	---
2.3	Qualidade do ambiente interno	X	X	---	X	---
2.4	Nível de Confiabilidade	X	X	X	X	X
2.5	Facilidade de manutenção	X	X	X	X	X
3	Premissas de cálculos (sistema e instalação)	X	X	X	X	---
4	Procedimentos analíticos e ferramentas de cálculos	X	X	X	X	---
5	Condições ambientais	X	X	---	X	---
6	Limitações do projeto	X	X	X	X	X
7	Premissas operacionais	X	X	X	X	X
8	Cálculos da evolução do projeto	X	X	---	X	---
9	Descritivo dos sistemas e como atendem o OPR	X	X	X	X	X
10	Descrição detalhada do sistema de automação e lógicas de controle dos sistemas	---	X	X	X	X
11	Normas e legislação aplicadas	X	X	X	X	X
12	Diretrizes e normas do proprietário	X	X	X	X	X
13	Demonstração do atendimento aos requisitos do OPR (planilha)	X	X	X	X	X

Fonte: Elaboração do autor.

A elaboração do BoD é uma atividade exclusiva das equipes do projeto. Nessa atividade, o papel do comissionamento é de orientar a elaboração do BoD com base no OPR e, por fim, validar o BoD em conformidade com o OPR.

A Figura 20 mostra a evolução do BoD durante todas as fases do processo de comissionamento para um sistema de ar condicionado, que se inicia a partir da fase de projeto.

Figura 20 – Fluxograma das atividades do BoD durante todo projeto



Fonte: ASHRAE, 2007.

3.2.2 MANUAL DOS SISTEMAS

O manual dos sistemas contém as informações e documentação sobre o planejamento, projeto, construção e comissionamento de um edifício, juntamente com requisitos operacionais, informações de manutenção, treinamento e documentação de testes para a operação e manutenção otimizadas dos sistemas ao longo de sua vida útil.

Esse é um documento muito importante para a operação dos sistemas prediais, porém apenas recentemente tem sido mais valorizado. O manual dos sistemas deve ser requerido e especificado desde a fase de concepção e ser revisado e atualizado desde o projeto até a ocupação. O ***ASHRAE Guideline 1.4 - 2014 – Procedures for Preparing Facility Systems Manuals*** fornece os procedimentos adequados para a preparação e montagem do manual dos sistemas prediais ao longo de todo o projeto e construção de um edifício.

O desenvolvimento do manual dos sistemas engloba a coleta de informações dos sistemas prediais, planejamento, projeto, construção, testes, comissionamento e atividades de treinamento, procedimentos operacionais e informações de manutenção, a fim de que seja um dos principais recursos de informações sobre os sistemas.

A documentação de treinamento também deve ser adicionada ao manual dos sistemas à medida que o treinamento é realizado.

A organização específica do manual dos sistemas deve ser adaptada para atender aos requisitos do proprietário. De acordo com ***ASHRAE Guideline 1.4 – 2014***, os seguintes tópicos devem ser abordados:

I. SUMÁRIO EXECUTIVO

II. PROJETO E CONSTRUÇÃO

- OPR/CFR;
- BoD (Bases de Projeto);
- Documentos de projeto dos sistemas prediais;
- Características de operação do edifício (horários de funcionamento, *setpoints*) estabelecidos no OPR/CFR.

III. INFORMAÇÕES DA CONSTRUÇÃO SOBRE OS SISTEMAS PREDIAIS

- Especificações dos equipamentos e sistemas;
- Propostas dos fornecedores aprovadas e dados técnicos dos contratos de aquisição;
- Dados de operação e manutenção dos equipamentos e componentes fornecidos pelos fabricantes;
- Garantias;
- Lógicas de controle, sequência de operação dos sistemas e desempenho dos sistemas integrados;
- Lista de fornecedores e informações de contato.

IV. OPERAÇÕES DOS SISTEMAS

- Manual de operações dos sistemas, incluindo os planos operacionais; *schedules* de operação dos equipamentos e sistemas, *setpoints* e faixas de operação; sequências de controle de operação de sistemas, limitações, ações sobre paradas de emergência;
- Planos e procedimentos de limpeza;
- Planos, procedimentos, listas de verificação e registros de atividades de manutenção;
- Cronogramas de manutenção;
- Manutenção dos registros de manutenção;
- Relatórios de M&V.

V. TREINAMENTO

- Planos e materiais de treinamento;
- Aplicação de treinamento e resolução de problemas;
- Registros de treinamento.

VI. RELATÓRIO DO PROCESSO DE COMISSIONAMENTO (Cx)

- Plano de Cx;
- Relatórios do processo de Cx e relatórios do TAB;
- Formulários de verificação preenchidos;
- Formulários dos testes de desempenho funcional preenchidos;
- Registros de problemas e soluções;
- Itens em aberto e lições aprendidas.

3.3 FASE DE CONSTRUÇÃO

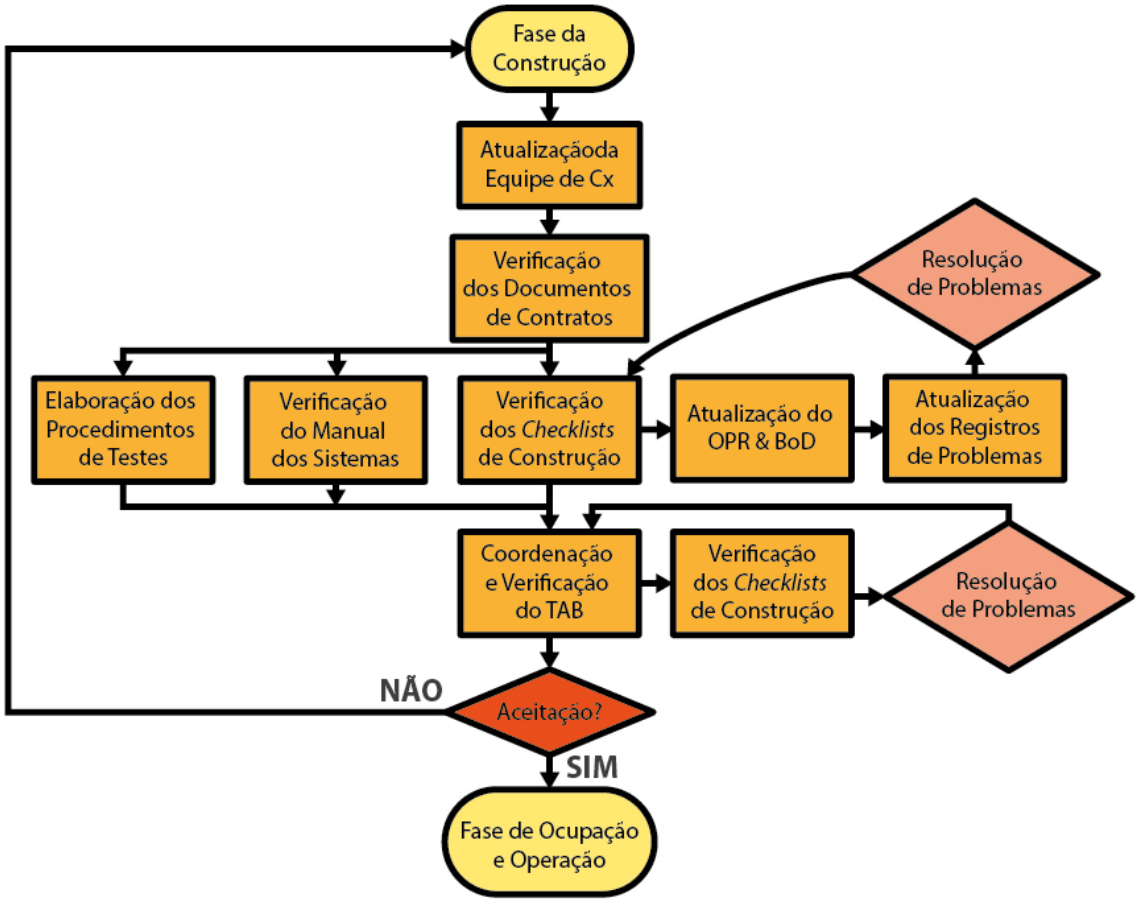
Na fase de construção, uma das primeiras atividades é a atualização da equipe de comissionamento, com a inclusão de representantes das principais empresas contratadas para a execução da obra. Nessa fase são executadas as verificações de campo, incluindo as atividades de TAB. A Figura 21 mostra um fluxograma com as principais atividades.

Na Fase de Construção, o processo de comissionamento inclui as seguintes atividades:

- Atualização do OPR;
- Atualização do Plano de Cx;
- Verificação das atualizações do projeto e do BoD, se estão em conformidade com OPR;
- Verificação das propostas dos fornecedores, se essas atendem ao OPR;
- Desenvolvimento dos procedimentos e especificações para o TAB – Testes, Ajustes e Balanceamento;
- Verificação dos sistemas e instalações, se esses estão em conformidade com o OPR;
- Entrega dos manuais dos sistemas;
- Verificação dos requisitos e programas de treinamento do pessoal de operação e manutenção do proprietário e dos ocupantes;
- Aceitação das atividades do processo de comissionamento da Fase de Construção.

As atividades de projeto na fase de construção, que devem ser realizadas pela equipe de projeto e consultores, devem ser incluídas no escopo dos serviços dos projetos. Essas atividades do processo de comissionamento podem ser mais do que nor-

Figura 21 – Fluxograma das atividades de Cx durante a fase de construção



Fonte: ASHRAE, 2013.

malmente exigido no âmbito das atividades das equipes de projeto. É extremamente importante a continuidade da participação das equipes de engenharia e arquitetura durante as Fases de Construção e de Ocupação e Operação.

Durante a fase de construção, são executadas outras atividades importantes de modo a garantir um bom desenvolvimento das obras de instalações dos sistemas prediais, tais como:

- Fiscalização de obras;
- Inspeções de construção;
- Gerenciamento de projeto na obra;
- Supervisão de engenharia nas atividades de montagem;
- Atividades de *start-up* dos equipamentos e instalações;

Porém, nenhuma dessas atividades abrange o comissionamento. Também não é função da equipe de comissionamento em campo realizar estas atividades. O objetivo das atividades de campo do processo de comissionamento é de verificar que os sistemas serão instalados para atender o OPR.

3.3.1 TAB – TESTES, AJUSTES E BALANCEAMENTO

Uma das atividades mais importantes do processo de comissionamento são as atividades de testes, ajustes e balanceamento dos equipamentos e sistemas em campo, após o *start-up* dos sistemas.

No entanto, há ainda muita confusão sobre o TAB, desde a fase de projeto, e muitos projetistas e proprietários ainda acham que o processo de comissionamento se resume às atividades do TAB.

Na prática, o TAB do sistema de ar condicionado muitas vezes se resume à realização exclusiva do balanceamento hidrônico e das redes de dutos. Em alguns casos são realizados ajustes parciais (normalmente configuração de equipamentos apenas) e raramente são realizados testes. Ou seja, há uma falta de conhecimento generalizada sobre o escopo e a importância do TAB total.

Normalmente esse desvio se inicia na fase de projeto quando não há comissionamento. A consequência é a falta de especificação adequada para o TAB do sistema de ar condicionado, que principalmente, no caso dos testes, deve incluir:

- **Testes que serão executados**, nos equipamentos e sistemas, indicando se por amostragem ou 100%;
- **Procedimentos de teste**, incluindo as atividades prévias necessárias, as responsabilidades dos envolvidos (agentes de TAB, representantes dos fornecedores, equipe de operação, técnicos de segurança, etc.) e a descrição detalhada dos testes;
- **Normas de teste aplicáveis** – Não devem ser aplicadas normas de testes em fábrica (típicas do AHRI) para testes de campo, pois muitos dos requisitos e condições de testes de fábrica não são possíveis de se obter em campo;
- **Instrumentação de teste**, incluindo a precisão e a resolução requeridas para os instrumentos e os métodos de validação das leituras realizadas em campo;
- **Condições de teste**, que o equipamento ou sistema deve ser desafiado para a verificação de operação e/ou de desempenho;
- **Análise dos resultados**, e quais parâmetros devem ser comparados. É importante observar que um teste não se trata de simples leituras de dados dos instrumentos ou dos painéis e registros em planilhas de um equipamento em operação;
- **Requisitos de aceitação**, com base nos limites definidos nas normas aplicáveis.

Além disso, muitas vezes o projeto do sistema não permite que os equipamentos sejam testados em campo porque não é possível instalar adequadamente a instrumentação de teste, por falta de espaço ou falta de componentes necessários na instalação para o teste. Todos esses detalhes fazem parte do escopo do processo de comissionamento durante a fase de projeto.

Há ainda uma discussão sobre quem deve fazer o TAB, se uma empresa independente indicada pela empresa que conduz o processo de comissionamento ou uma subcontratada do instalador.

Na primeira opção, é necessário que haja o processo de comissionamento em andamento, anterior às atividades de contratação do TAB. Na segunda

opção, sempre haverá uma grande tensão entre fazer o que é certo e entregar no prazo com a aceitação.

A seguir, as principais atividades realizadas durante o processo de testes, ajustes e balanceamento típico de um sistema de ar condicionado.

SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE AR

No sistema de distribuição de ar, as seguintes atividades são essenciais:

- **Balanceamento das redes de distribuição de ar.** Não se trata de obter-se a vazão de projeto (as incertezas das medições de vazão de ar podem ser muito elevadas), mas de garantir o equilíbrio proporcional (balanceamento);
- **Testes de desempenho dos condicionadores de ar.** Isso se aplica a equipamentos de maior porte (*Fan Coils*, AHUs). Fancoletes e evaporadoras de sistemas tipo VRF ou *Splits* não são viáveis testar, o que não é uma vantagem, mas demonstra a limitação desses equipamentos em atenderem requisitos de desempenho;
- **Testes operacionais e funcionais dos ventiladores e exaustores** dos sistemas de ventilação e exaustão mecânica;
- **Testes funcionais e testes de segurança do sistema de pressurização de escadas**. Normalmente isso é realizado por ser requisito de legislação;
- **Ajustes e configurações dos ventiladores dos condicionadores de ar;**
- **Ajustes físicos e configurações das caixas de VAVs;**
- **Ajustes dos *setpoints* de controle** (são inúmeros e fundamentais) e otimização do sistema de distribuição de ar. Isso deve fazer parte do escopo da equipe de TAB atuando sobre o sistema de automação e não da empresa que fornece a automação. É importante observar que a competência das atribuições:
  - **Engenheiros e Técnicos de automação**, essencialmente eletricistas, são responsáveis pelos ajustes e testes de *hardware* e *software*;
  - **Engenheiros e técnicos do TAB**, essencialmente mecânicos, são responsáveis pelos ajustes funcionais e operacionais do sistema de ar condicionado.

SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA GELADA (INCLUINDO A CAG)

No sistema de distribuição de água gelada, as seguintes atividades são essenciais:

- **Balanceamento da rede hidrônica que atende os condicionadores de ar**. Deve ser realizado de maneira otimizada para evitar válvulas de balanceamento muito restringidas e bombas operando com máxima frequência;
- **Balanceamento do circuito primário de água gelada e do circuito de água de resfriamento** (quando aplicável). Há ainda muitos projetos que não requerem a instalação de válvulas de balanceamento (água gelada e água de resfriamento) nos *Chillers* e torres de resfriamento, que são essenciais para o controle adequado dos *Chillers*;
- **Testes operacionais das bombas**. Recomenda-se incluir o levantamento das curvas características e das curvas de rendimento das bombas;
- **Testes de operação e desempenho das torres de resfriamento**. Muitas torres vendidas no mercado não possuem certificados de desempenho. É extremamente importante lembrar que o desempenho dos *Chillers* está ligado diretamente ao resultado do desempenho das torres de resfriamento.
- **Testes de desempenho dos *Chillers***, que são responsáveis por 20% a 30% do consumo de energia de todo o prédio. Os índices de eficiência (COP e SPLV ou IPLV), além da capacidade efetiva, são os principais requisitos no projeto e no processo de compra de *Chillers*. Portanto, é extremamente importante testá-los. Apesar de serem equipamentos de alta confiabilidade, há histórico de desvios negativos relevantes nos resultados, a maioria deles devido à falta de ajustes adequados na ocasião do *Start-up* do equipamento (devido à carga insuficiente ou excessiva de fluido refrigerante e configuração dos elementos de controle interno do equipamento). Deve-se observar ainda que é mais difícil testar equipamentos de sistemas VRF. Uma das principais limitações é a falta de disponibilidade dos dados necessários para os testes por parte dos fornecedores e a impossibilidade de instalação de instrumentação de teste, não requerida pelo projeto. Muito diferente dos *Chillers*, onde as informações sobre os dados de desempenho são

detalhadamente disponibilizadas pelos fornecedores e o sistema normalmente permite a instalação de todos os instrumentos necessários;

- **Ajustes dos *setpoints* de controle** (inúmeros e fundamentais) e otimização do sistema de distribuição de ar. Isso deve fazer parte do escopo da equipe de TAB atuando sobre o sistema de automação e não da empresa que fornece a automação.

3.3.2 TESTES FUNCIONAIS E TESTES INTEGRADOS COM O SISTEMA DE AUTOMAÇÃO

Os testes funcionais e testes integrados do sistema de ar condicionado operando sob o controle e monitoração do sistema de automação são fundamentais para garantir uma operação adequada no futuro.

É muito importante que os testes funcionais sejam realizados a partir das atividades do TAB, principalmente após as configurações dos equipamentos e as definições dos valores de *setpoint* de controle de todo sistema. Se o TAB não for totalmente executado, o sistema de automação fica mais limitado. A falta do TAB adequado é uma das principais causas de um sistema que não funciona em modo automático de maneira otimizada, ou ainda, que só funciona em modo manual remoto.

No sistema de automação, há uma série de testes e ajustes que são inerentes a este sistema, envolvendo análise da arquitetura do sistema, análise do desenvolvimento de malhas, análise das configurações de *hardware*, sistemas de proteção operacional da automação, redundâncias, etc. Essas atividades devem ser realizadas por outra equipe de testes, especializada em *software* e *hardware* e diferente da equipe do TAB do sistema de ar condicionado.

No entanto, os testes funcionais e os testes integrados do sistema de ar condicionado deverão ser realizados pela equipe do TAB do sistema de ar condicionado, com o sistema de automação sendo analisado e testado apenas como uma ferramenta para o controle do sistema de ar condicionado. Essa atividade pode ser um problema quando a empresa do TAB do sistema de ar condicionado é contratada pelo instalador do sistema de ar condicionado, mas o sistema de automação está fora do seu escopo, pois o sistema de automação abrange várias outras disciplinas (sistemas elétricos, hidrossanitários, CFTV, controle de acesso, elevadores, etc.).

Por se tratarem de testes muito importantes, recomenda-se ainda que sejam conduzidos pela autoridade de comissionamento ou por um agente de comissionamento, envolvendo a participação das equipes do TAB do sistema de ar condicionado, TAB do sistema de automação, além dos demais participantes requeridos, conforme estabelecido no Plano de Cx e nas especificações para contratação dos fornecedores.

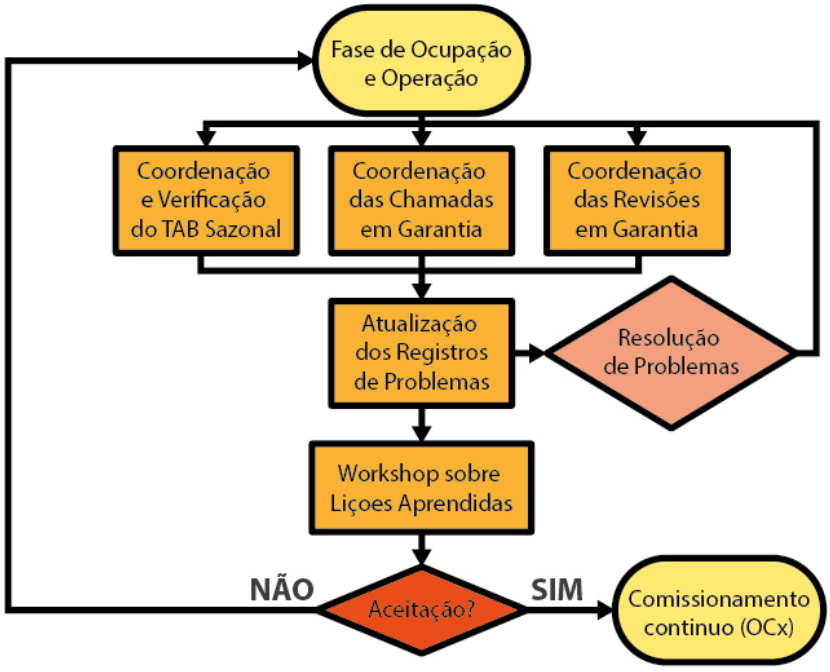
Os testes funcionais e testes integrados requeridos para o sistema de ar condicionado são os seguintes:

- **Testes de desempenho funcional dos condicionadores de ar e dos elementos de controle do sistema de distribuição de ar**, quando os condicionadores de ar, caixas de VAV e demais elementos de controle são desafiados a manter os ambientes condicionados dentro dos parâmetros de conforto e com a taxa de renovação de ar adequada. Muitas vezes esses testes só podem ser realizados após a ocupação substancial do edifício, ou pelos menos por pavimento ocupado;
- **Testes de desempenho funcional do sistema de água gelada** e seus elementos de controle. Esses testes podem ser realizados um pouco antes ou logo no início da ocupação, entretanto, será necessária uma análise prévia de adequação de alguns parâmetros de controle específicos para o teste de modo a permitir o funcionamento dos equipamentos, mesmo com carga térmica menor. No item 3.9 é apresentado um exemplo de relatório de teste de desempenho funcional de um sistema de água gelada.

3.4 FASE DE OCUPAÇÃO E OPERAÇÃO

A Figura 22 mostra um fluxograma com as principais atividades do processo de comissionamento durante a fase de ocupação e operação, quando o edifício é habitado. Com seu funcionamento efetivo, os índices de desempenho dos sistemas serão verificados e novos ajustes poderão ser realizados a partir das percepções dos usuários para que os requisitos de conforto ambiental e qualidade do ar sejam atendidos.

Figura 22 – Fluxograma das atividades de Cx durante a fase de ocupação e operação



Fonte: ASHRAE, 2013.

Também serão verificadas a funcionalidade dos sistemas e das equipes de operação e manutenção, após treinamento e capacitação.

O envolvimento ativo da autoridade de comissionamento e da equipe de comissionamento durante o início da fase de ocupação e operação de um projeto é uma atividade integral do processo de comissionamento.

Na Fase de Ocupação e Operação, o processo de comissionamento inclui as seguintes atividades:

- Utilização dos conhecimentos do projeto e da experiência da Autoridade de Comissionamento para minimizar os retornos de chamada de garantia dos contratados;
- Fornecimento de orientação contínua sobre as equipes de operação e manutenção para alcançar os Requisitos de Projeto do Proprietário;
- Conclusão dos ensaios sazonais dos sistemas;
- Condução das sessões sobre lições aprendidas da aplicação do processo de comissionamento incluindo documentação para aplicação no próximo projeto;
- Aceitação da Fase de Ocupação e Operação.

3.5 POR QUE CONTRATAR O PROCESSO DE COMISSIONAMENTO?

As principais razões para a inclusão do processo de comissionamento em um projeto são resultantes de análises de sistemas existentes (nos quais foram realizados o processo de retrocomissionamento – ver item 3.6 do Volume III), muitos dos quais com características iniciais de projeto de alto desempenho, mas que apresentaram desvios consideráveis em relação às expectativas dos proprietários e usuários.

Levantamentos realizados nos EUA, por entidades reconhecidas como o LBNL (Lawrence Berkley National Laboratory) e o PECI (Portland Energy Conservation, Inc) indicaram que os edifícios não rendem o desempenho esperado, pois:

- Há perda de informações desde o projeto até a operação;
- Os operadores recebem documentação insuficiente;
- Os sistemas prediais são mais complexos devido às novas tecnologias agregadas aos equipamentos e sistemas, principalmente nos elementos de controle;

- Falta de treinamento adequado às equipes de operação;
- Operadores gastam mais tempo "tentando" minimizar as reclamações;
- O TAB do sistema de ar condicionado foi contratado pelo instalador do sistema de ar condicionado, mas o sistema de controle e automação é escopo de outra empresa. Como consequência, muitos ajustes não são realizados de maneira adequada;
- Sistema de automação incompleto quando comparado com a concepção do projeto:
  - Equipamentos operando desnecessariamente;
  - *Chillers* não integrados ao sistema de automação;
  - Sensores e caixas de VAV não aferidos fisicamente;
  - Lógicas padrões não otimizadas para aquele sistema.
- Alterações drásticas de *layout* nos ambientes;
- Alteração da carga interna;
- Alteração da temperatura de conforto;
- Alteração dos horários de operação;
- Alteração de várias condições de operação dos equipamentos do sistema.

Os principais fatores que afetam a eficiência operacional, mesmo em edifícios com um bom projeto, mas que não foram considerados na elaboração da simulação energética ou pelo projeto e construção são:

- Comissionamento mal executado;
- Alterações no conceito original do projeto fora do controle do OPR e do BoD;
- Construção com baixa qualidade;
- Componentes baratos e não confiáveis;
- Controles programados de forma ineficiente ou incorreta;
- Sistema com muitas limitações para manutenção;
- Difícil acesso aos elementos de controle e regulagem no campo;
- Equipamento de má qualidade ou projeto mal executado;
- Superdimensionamento de equipamentos e sistemas;
- Sensores mal instalados ou descalibrados;
- Zoneamento inadequado;
- Operação deficiente (sem treinamento adequado);
- Usuários que exigem condições de operação do ambiente fora da faixa operacional normal (ex: temperatura ambiente de 19 °C).

Resumindo, todos esses resultados demandam a necessidade da inclusão do processo de comissionamento adequado nos projetos.

3.6 BENEFÍCIOS DO PROCESSO DE COMISSIONAMENTO

Inicialmente é importante mencionar alguns impactos positivos do processo de comissionamento para o projeto de uma edificação:

- O projeto passa a ter um controle de qualidade com o foco no desempenho final do edifício, envolvendo eficiência energética e, principalmente, a produtividade dos usuários;
- Preenche as lacunas nos processos de comunicação entre projeto, construção e operação;
- Reduz os aditivos na fase de construção resultantes de alterações no projeto;
- Verifica se os requisitos de projeto foram atingidos;
- Monitora, em várias etapas, a conformidade do projeto e da construção;
- Assegura que os sistemas funcionem conforme o esperado;
- Valida as medições e verificações de desempenho dos sistemas (não apenas o desempenho energético);
- Melhor treinamento das equipes de operação.

O ***ASHRAE Guideline 0-2013*** esclarece que processo de comissionamento também traz benefícios aos envolvidos no projeto:

EQUIPES DE PROJETO

- Melhora a participação das equipes do projeto ao longo de todo o projeto, até a ocupação e operação. Isso aumenta o escopo do trabalho e o custo do projeto. Apesar do aumento de custo eventualmente não soar bem aos ouvidos do proprietário, trata-se de um serviço mais completo, que trará mais benefícios ao sistema e ajudará a diminuir outros custos ao longo da construção. A autoridade de comissionamento facilmente pode demonstrar isso e advogar em causa perante o proprietário.
- Reduz da exposição aos riscos resultantes de erros de projeto;
- Aprimora a base de conhecimento para uso em futuros projetos;
- As contribuições dos outros participantes tornam o desenvolvimento do projeto uma atividade mais eficiente e mais rentável;
- Reduz do número de incompatibilidades verificadas durante a construção devido à melhor comunicação e coordenação ao longo do projeto.

FORNECEDORES

- Melhora o planejamento e coordenação por meio da implementação do Plano de Comissionamento;
- Melhora a coordenação entre os diferentes instaladores e menor probabilidade de interferência nos desenhos de execução exigidos em todo o projeto;
- Reduz substancialmente do número de listas de pendências;
- Reduz o número de *callbacks*;
- Reduz o número de chamadas para orientação operacional devido à participação em programas de treinamento para o pessoal de operações e manutenção.

PROPRIETÁRIOS

- Aumenta o conhecimento do operador sobre como otimizar a operação e manutenção da instalação, devido à inclusão prévia dos operadores no processo de comissionamento;
- Reduz os requisitos de treinamento devido à atualização contínua da documentação sobre como os sistemas devem operar e ser mantidos; o pessoal só precisará treinado em relação às mudanças;
- O desempenho das instalações estará de acordo com os Requisitos do Projeto do Proprietário;
- Os Manuais dos Sistemas tornam-se documentos de referência essenciais para operação e manutenção dos sistemas;
- Reduz do tempo de inatividade dos sistemas e componentes devido ao melhor diagnóstico de falhas;
- Aumenta a capacidade de fornecer informações precisas aos usuários sobre a operação e manutenção dos sistemas;
- Reduz custos operacionais, ou pelo menos os torna mais efetivos com a utilização de técnicas operacionais melhoradas;
- Traz benefícios para os usuários do prédio, incluindo maior produtividade, redução de reclamações e menor incidência de absenteísmo por problemas de saúde.

3.7 BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA PARA O PROCESSO DE COMISSIONAMENTO

O processo de comissionamento ainda é um desafio no Brasil e para que ele seja aplicado com eficácia nos projetos, há muitos conceitos que precisam ser redefinidos ou aprimorados na estrutura dos projetos. Nos EUA, algumas associações produziram um material muito rico e esclarecedor sobre os detalhes e procedimentos para aplicação do processo de comissionamento. A seguir, as principais publicações disponíveis:

- ASHRAE Guideline 0-2013 – The Commissioning Process;
- ASHRAE Guideline 0.2-2015 – Commissioning Process for Existing Systems and Assemblies;
- ASHRAE Guideline 1.1-2007 – HVAC&R Technical Requirements for The Commissioning Process;
- ASHRAE Guideline 1.4-2014 – Procedures for

Preparing Facility Systems Manuals;

- ASHRAE Guideline 1.5-2012 – The Commissioning Process for Smoke Control Systems;
- ASHRAE Standard 202-2013 – Commissioning Process for Buildings and Systems;
- NIBS Guideline 3-2012 – Building Enclosure Commissioning Process – BECx;
- NEBB Procedural Standard for Whole Building Systems Technical Commissioning – 2009 – 3rd Edition;
- NEBB Procedural Standard for Retro-Commissioning of Existing Buildings – 2009 1st Edition;
- BCA Building Commissioning Handbook – 2nd Edition;
- EDR Building Commissioning Guidelines;
- ICC Commissioning Guideline;
- PECI New Construction Commissioning Handbook for Facility Managers;
- FEMP Continuous Commissioning Guidebook for Federal Energy Managers.

3.8 EXEMPLO DE TESTE DE DESEMPENHO DE *CHILLER*

Os testes de desempenho dos *Chillers* fazem parte das atividades do TAB, dentro do processo de comissionamento, e por serem os equipamentos de maior consumo de energia de um sistema de água gelada, os índices de desempenho (COP) são requisitos importantes no OPR e muitas vezes são fatores decisivos na escolha dos modelos a serem adquiridos. Daí a importância da verificação do seu desempenho em campo. Em alguns casos, quando os *Chillers* são importados, o cliente pode solicitar os testes de desempenho em fábrica, em bancadas certificadas, de acordo com os requisitos do ***ANSI/AHRI Standard 550/590***. Outra opção é testá-los no campo, após o *start-up* do sistema de água gelada.

A seguir, é apresentado como exemplo um relatório de teste de desempenho de um *Chiller* realizado de acordo com o ***ANSI/ASHRAE Standard 30-1995***, que estabelece parâmetros para testes em campo de desempenho de *Chillers*. O objetivo do teste foi de verificar as condições atuais de capacidade máxima e desempenho (eficiência energética) do *Chiller* para aprovação e aceite final.

3.8.1 DADOS DE PROJETO DO *CHILLER*

A Tabela 11 apresenta os dados de projeto do *Chiller* testado. O sistema de água gelada era do tipo primário e secundário, operando com um tanque de termoacumulação de água gelada.

Vale observar que as condições de temperatura de água de resfriamento eram mais elevadas que as condições típicas de sistemas de ar condicionado, pois as torres de resfriamento atendiam paralelamente outros processos industriais, que operavam em condições diferentes.

Tabela 11 – Dados de projeto do CH-03

TAG		**CH-03**
Fluido Refrigerante		R-134a
Carga de Refrigerante	kg	819
Capacidade	**kW (ton)**	**1.407 (400)**
Potência Absorvida	kW	271,1
Corrente – Máxima Carga (FLA)	A	477
Tensão de Entrada	V	380

(continua)

TAG		CH-03
Coeficiente de Performance	kW/kW	5,192
	kW/ton	0,676
Temp. Entrada - Água Gelada	°C	14,1
Temp. Saída - Água Gelada	°C	5,5
Vazão - Água Gelada	m³/h	141
Perda de Carga - Água Gelada	kPa	27,5
Temp. Entrada - Água de Resfriamento	°C	31,0
Temp. Saída - Água de Resfriamento	°C	37,3
Vazão - Água de Resfriamento	m³/h	223
Perda de Carga - Água de Resfriamento	kPa	13,6

Fonte: Elaboração do autor.

3.8.2 INSTALAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO DE TESTE

Foram instalados os seguintes instrumentos de campo no CH-03 para aquisição de dados:

- Dispositivos com sensores de temperatura para aquisição de dados nos seguintes pontos:
  - Entrada e Saída de água gelada no CH-03 (Evaporador);
  - Entrada e Saída de água de resfriamento no CH-03 (Condensador);
- Medidor de vazão do tipo ultrassom na tubulação de entrada de água gelada do CH-03, para aquisição de dados de vazão de água gelada. Antes do teste, a vazão de água gelada foi ajustada para as condições de projeto do CH-03;
- Medidor de vazão do tipo pressão diferencial na válvula de balanceamento na saída do condensador do *Chiller*. Antes do teste, a vazão de água de resfriamento foi ajustada para as condições de projeto do CH-03 utilizando o medidor de vazão por ultrassom;
- Analisador de energia, para aquisição de dados de tensão, corrente e potência absorvida no motor do CH-03. Esse instrumento foi instalado no painel elétrico local do *Chiller*.

3.8.3 AJUSTE DE VAZÕES DE PROJETO

Antes do início do teste, foi realizado o ajuste de vazão de água gelada, de acordo com o valor de projeto para os testes na condição de um *Chiller* e uma BAGP em operação.

Para a condição de dois *Chillers* e duas BAGPs em operação, verificou-se uma pequena diminuição da vazão, mas o valor máximo verificado ficou acima do limite mínimo de 95% da vazão de projeto, conforme estabelecido pelo ***ANSI/ASHRAE Standard 30-1995***.

No circuito de água de resfriamento, foi realizado o mesmo procedimento, com o *Chiller* operando constantemente com a BAC-03.

3.8.4 EXECUÇÃO DO TESTE

1) Antes de iniciar os testes, os instrumentos de aquisição de dados foram programados (de forma sincronizada) para realizarem leituras simultâneas a cada 10 segundos;
2) Com o início dos testes, foram realizadas leituras periódicas em sessões de regime estabilizado, após pelo menos 15 minutos depois da estabilização;
3) Após estabilizado o regime, para cada condição de teste foram realizadas leituras tantas quantas

suficientes para atender o ***ANSI/ASHRAE Standard 30-1995***, com um mínimo de três leituras com cinco minutos de intervalo entre elas (ver item 3.8.5);

4) De acordo com o ***ANSI/ASHRAE Standard 30-1995***, os requisitos de regime estabilizado para validar uma sequência de três leituras devem cumprir os seguintes requisitos:

   - As temperaturas de água gelada e água de resfriamento (entrada/saída) não poderão ter variação superior a 0,3 ºC (+/- 0,15 ºC) durante as três leituras;
   - A vazão de água gelada e a vazão de água de resfriamento não deverão ter oscilações maiores que 5% da vazão de projeto.

3.8.5 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DOS DADOS

Após coletados, os dados foram tratados para confecção de gráficos em função do tempo das variáveis monitoradas e os cálculos resultantes, mostrados no item 3.8.6.

Em seguida, foram selecionadas algumas leituras de dados simultâneos, que são apresentadas no item 3.8.7 Para a validação de cada leitura apresentada, após verificada uma condição de operação estabilizada do CH-03, foi considerada a análise de 66 registros dos sensores (a cada 10 segundos em período equivalente a 3 leituras com 5 minutos de intervalo entre elas), conforme os requisitos de regime estabilizado estabelecidos no ***ANSI/ASHRAE Standard 30-1995***.

Para cada leitura válida de temperatura, vazão, corrente e potência, foram coletadas amostras e registradas as médias e os desvios máximos no intervalo. Para a incerteza, foi calculado o desvio padrão das leituras, multiplicado por um fator 3 (**3**σ), o que resulta em um grau de confiabilidade de 99.5%. Em casos onde o desvio foi menor do que a precisão do instrumento, prevaleceu a precisão do instrumento (ex. **3**σ = 0,09 °C e P= 0,12 °C, foi utilizado 0,12 °C). Para os desvios dos valores calculados, foram utilizadas as equações de propagação de erro em cálculos de probabilidade.

Os valores calculados foram obtidos a partir das seguintes equações:

Capacidade:

$$Q_{resf} = V_{AG} \cdot \rho_{AG} \cdot cp_{AG} \cdot (t_{ent} - t_{sai})_{AG} \quad (kW) \quad [1]$$

Calor Rejeitado:

$$Q_{cond} = V_{AC} \cdot \rho_{AC} \cdot cp_{AC} \cdot (t_{sai} - t_{ent})_{AC} \quad (kW) \quad [2]$$

Coeficiente de Performance:

$$COP = \frac{Q_{resf}}{W_{cp}} \quad (kW/kW) \quad [3]$$

Tolerância Limite:

$$T_L = 10,5 - 0,07 \cdot \%FL + \left(\frac{833,3}{\Delta T_{FL} \cdot \%FL}\right) \quad (\%) \quad [4]$$

Onde:

- **V_{AG} –** Vazão de Água Gelada (m^3/s)
- **V_{AC} –** Vazão de Água de Resfriamento (m^3/s)
- **t_{ent} / t_{sai} –** Temperatura de Entrada/Temperatura de Saída (°C)
- **W_{CP} –** Consumo de Potência no Eixo do Compressor (kW)
- **%FL –** Porcentagem Atual de Capacidade referente à Capacidade de Projeto
- **DT_{FL} –** Diferencial de Temperatura da Água Gelada na Capacidade de Projeto
- **Cp –** Calor Específico da Água (kJ/kg.K)
- **ρ –** Densidade da Água (kg/m^3)

As propriedades físicas da água foram obtidas utilizando-se o *software* "BRINE" versão 21.60, de 2012, do International Technical Computing (ITC) – Danmark. A temperatura de referência utilizada foi a média entre entrada e saída de água do *Chiller*.

Após análise das leituras válidas obtidas em campo, foram realizadas simulações utilizando o *software* de selecionamento do fabricante, para o modelo do *Chiller* testado, utilizando como dados de entrada os valores reais obtidos em campo. No item 3.8.8 são apresentados os resultados de campo que foram comparados com os resultados do *software* de selecionamento do fabricante, para cada leitura de campo, utilizando como parâmetro de aceitação a tolerância limite definida no ***ANSI/ASHRAE Standard 30-1995***.

3.8.6 SESSÕES DE TESTES DE CAMPO – GRÁFICOS

Os gráficos a seguir mostram os resultados das monitorações dos principais dados operacionais do CH-03 durante as sessões de testes de campo.

O Gráfico 4 mostra o perfil de temperaturas de água gelada, na entrada e saída do *Chiller*. O *setpoint* de temperatura de saída de água gelada estava em 5,5 ºC e o CH-03 operou durante o teste praticamente mantendo esta temperatura. A partir das 21h00min do dia 18 de outubro também foi monitorada a temperatura de evaporação do fluido refrigerante (R-134a), obtido do painel de controle do *Chiller*.

O Gráfico 5 mostra o perfil de vazão de água gelada, com vazão praticamente constante, dentro dos limites de tolerância da vazão de projeto.

O Gráfico 6 mostra o perfil de capacidade, com valor máximo em torno de 1200 kW.

O Gráfico 7 mostra o perfil de temperaturas de água de resfriamento, na entrada e saída do condensador do *Chiller*. A partir das 21h00min do dia 18 de outubro também foi monitorada a temperatura de condensação do R-134a, obtido do painel de controle do *Chiller*. As condições de operação foram mais favoráveis que as condições de projeto, com temperatura de entrada de água de resfriamento abaixo de 29,0 ºC.

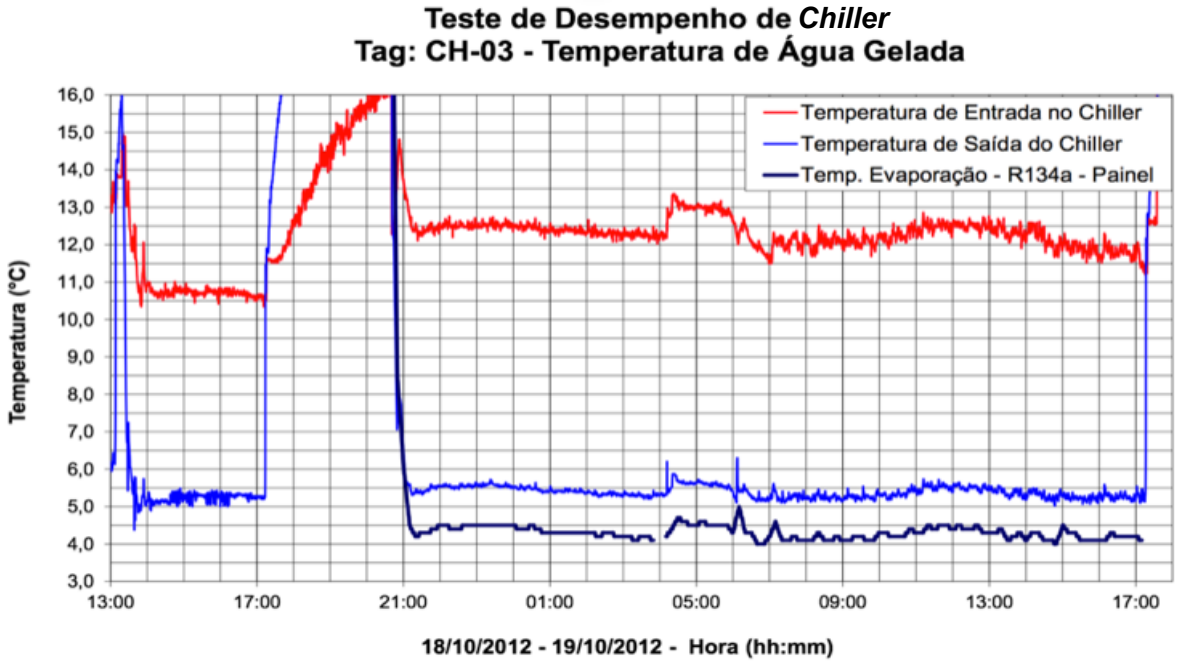
O Gráfico 8 mostra o perfil de vazão de água de resfriamento, com vazão praticamente igual ao valor de projeto.

O Gráfico 9 mostra a potência absorvida no motor elétrico e o Gráfico 10, o perfil do COP durante os testes, indicando um valor em torno de 4,6 kW/kW, quase 13% abaixo do valor de projeto. Devido às condições de água de resfriamento mais favoráveis, era esperado um valor ainda maior que o valor de projeto para o CH-03 operando em condições de carga máxima.

O Gráfico 11 mostra o perfil de porcentagem de carga (em relação à corrente em carga máxima (% FLA – do inglês, *Full Load Amps* – 461 A), porcentagem da potência em relação à potência absorvida nas condições de projeto (271 kW) e porcentagem de capacidade em relação à capacidade máxima nas condições de projeto (1.407 kW). Inclui ainda o perfil da frequência do inversor do motor elétrico do compressor.

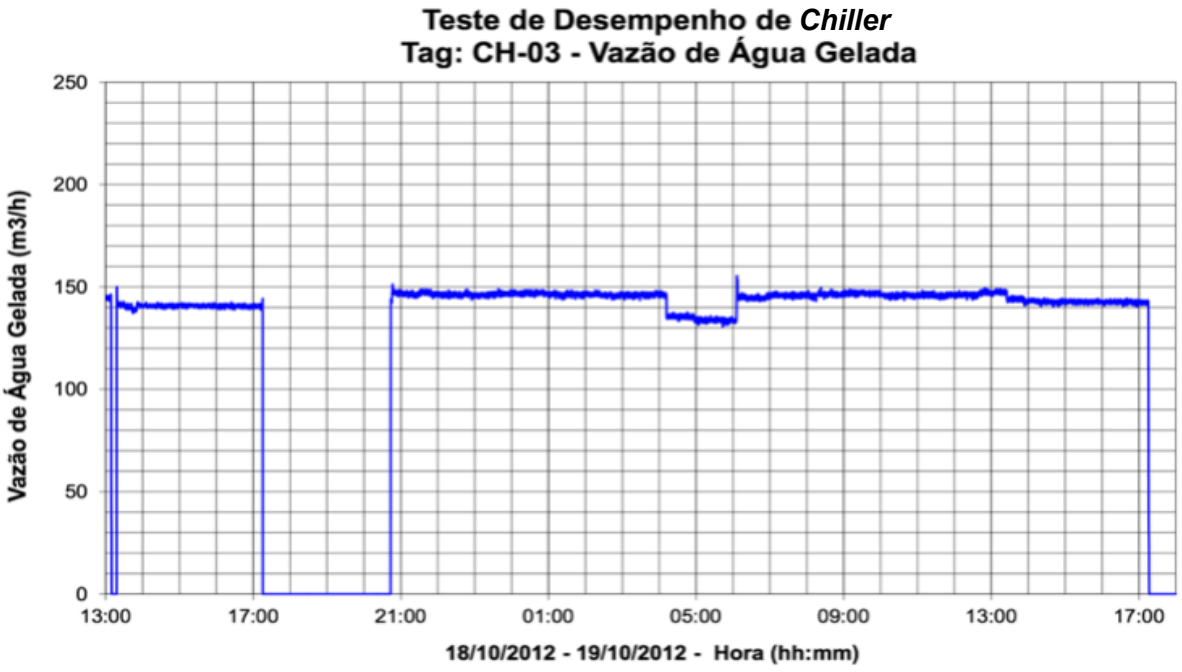
Durante a monitoração, foram obtidos alguns dados do painel de controle do CH-03 por meio do sistema de automação (curvas nos gráficos indicadas com sufixo **Painel**).

Gráfico 4 – Temperaturas de Água Gelada no CH-03



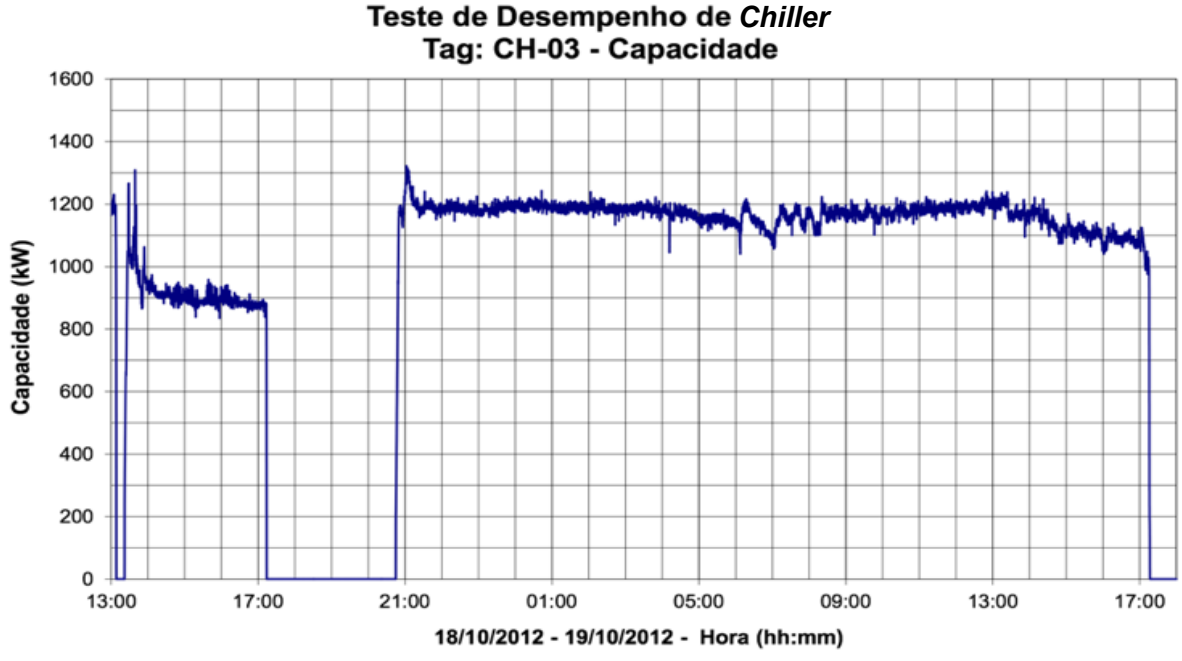
Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 5 – Vazão de Água Gelada no CH-03



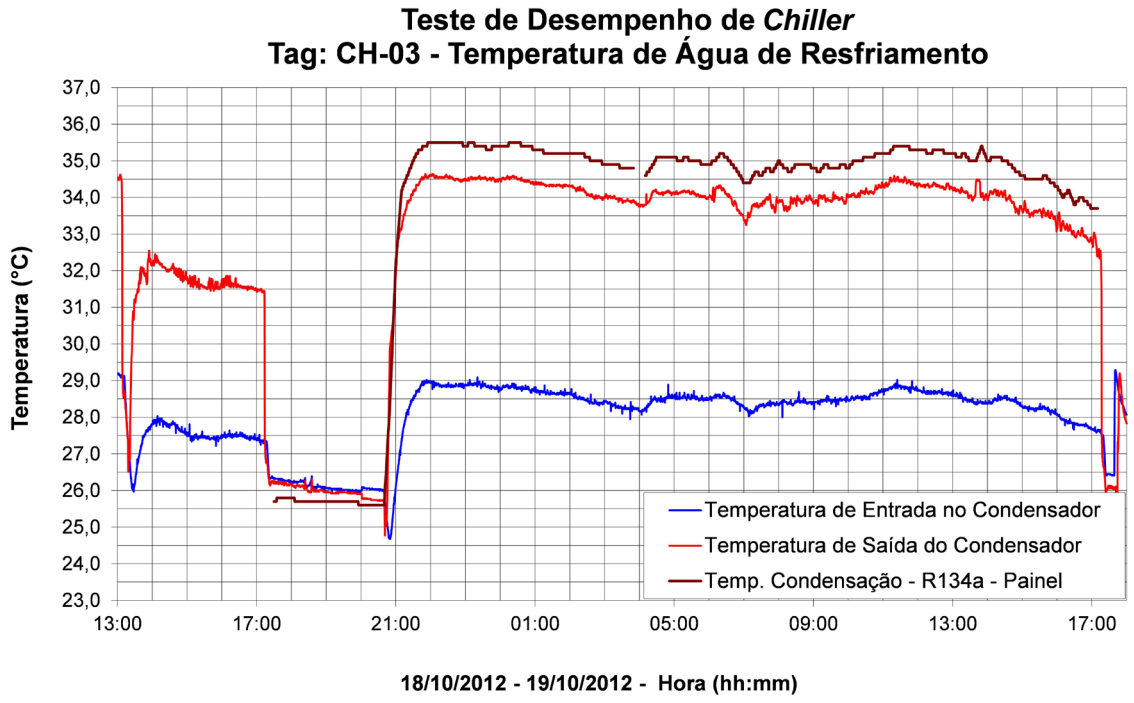
Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 6 – Capacidade do CH-03



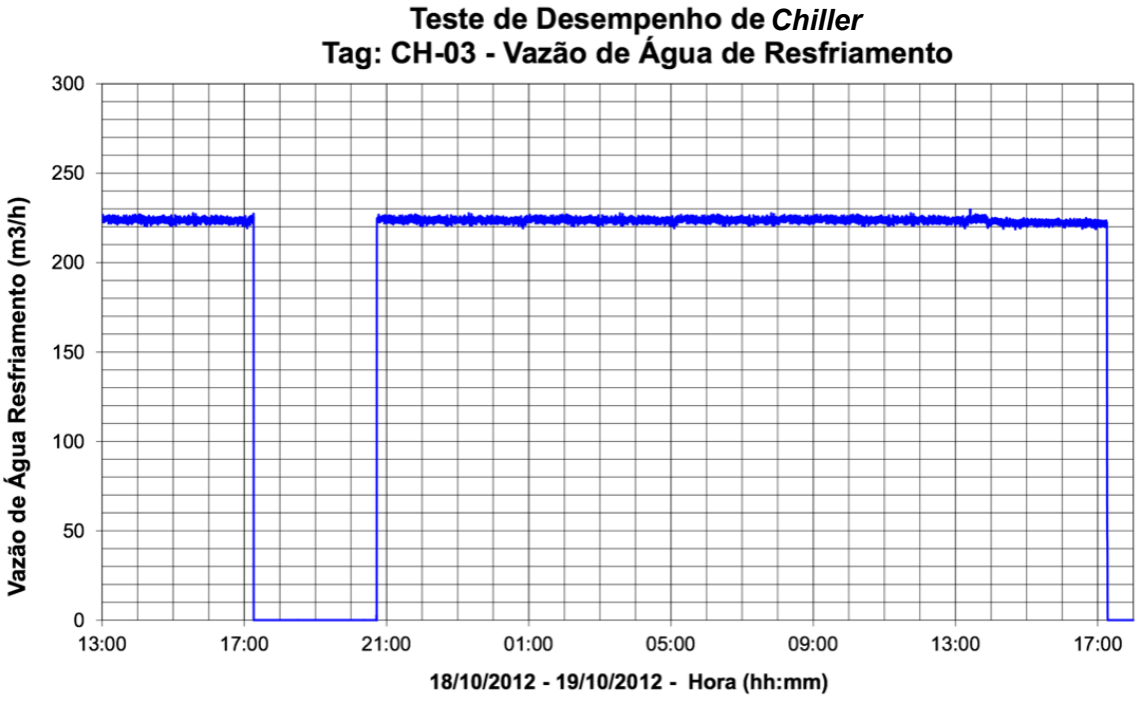
Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 7 – Temperaturas de Água de Resfriamento no CH-03



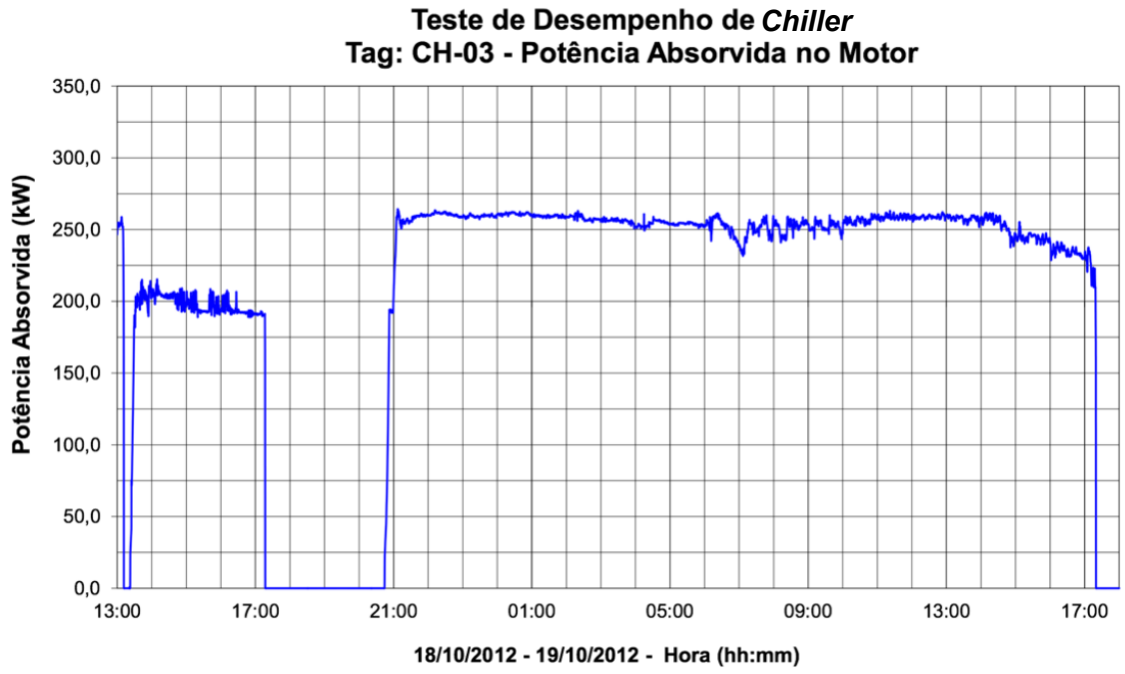
Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 8 – Vazão de Água de Resfriamento no CH-03



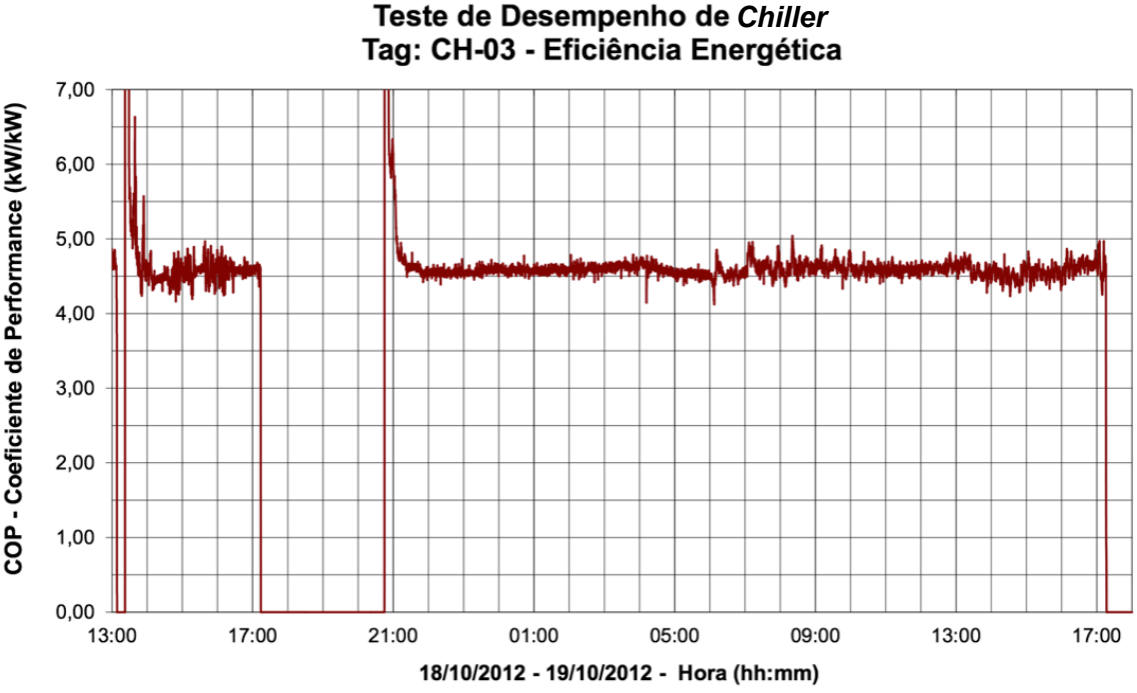
Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 9 – Potência Absorvida no Motor do CH-03



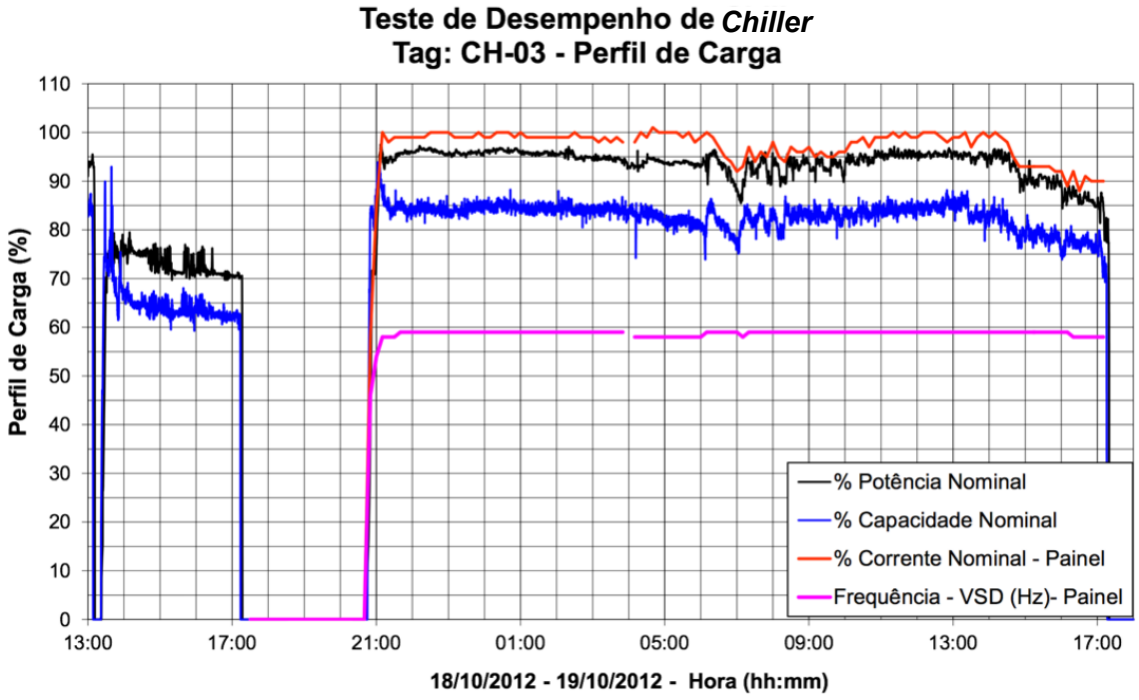
Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 10 – Eficiência Energética (COP) do CH-03



Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 11 – Perfil de Carga do CH-03



Fonte: Elaboração do autor.

3.8.7 SESSÕES DE TESTES DE CAMPO – LEITURAS

Após análise dos dados de campo, foram selecionadas algumas leituras como indicado no item 3.8.5. As Tabelas 12 e 13 mostram os resultados de algumas das leituras válidas realizadas.

Nota:

- Os valores em azul foram obtidos da instrumentação de teste.
- Os valores em vermelho foram calculados utilizando os valores obtidos da instrumentação de teste (ver item 3.8.2) e as equações do item 3.8.5.
- Os valores em rosa foram obtidos por meio das leituras de campo no painel do *Chiller*.
- Os valores de Porcentagem de Capacidade (%) indicam a relação entre a capacidade real atual calculada e a capacidade nominal do CH-03 (1.407 kW = 400 ton).
- Os valores de Porcentagem da Potência Nominal (%) indicam a relação entre a potência absorvida atual medida e a potência absorvida nominal do CH-03.
- Os valores de porcentagem de corrente indicam a relação entre a corrente do motor atual medida e a corrente em carga máxima (% FLA) do CH-03.
- Os valores indicados precedidos com sinais +/- indicam a precisão do valor medido na mesma unidade da grandeza em referência (ex.: 5,43 ºC +/-0,13 ºC ou 1.261,9 kW +/-29,2 kW).

Tabela 12 – Teste de Desempenho do CH-03 – Leituras de Dados 1 a 6

Leitura N.	1	2	3	4	5	6
Data	18/10	18/10	18/10	18/10	18/10	18/10
Período	15:20 15:31	16:15 16:26	16:30 16:41	16:45 16:56	22:30 22:41	23:00 23:11
Porcentagem de Capacidade (%)	62,8	63,0	62,5	62,4	84,2	83,7
Condições da Água Gelada						
Temp. Entrada Água Gelada (°C)	10,70 +/- 0,12	10,71 +/- 0,12	10,69 +/- 0,12	10,62 +/- 0,12	12,52 +/- 0,12	12,50 +/- 0,12
Temp. Saída Água Gelada (°C)	5,31 +/- 0,2	5,30 +/- 0,12	5,32 +/- 0,12	5,26 +/- 0,12	5,55 +/- 0,12	5,57 +/- 0,12
Vazão Água Gelada (m³/h)	140,8 +/- 1,4	140,7 +/- 1,8	140,6 +/- 1,6	140,5 +/- 1,7	146,0 +/- 2,2	145,9 +/- 2,0
Condições da Água de Resfriamento						
Temp. Entrada Água Resfriamento (°C)	27,47 +/- 0,12	27,49 +/- 0,12	27,49 +/- 0,12	27,44 +/- 0,12	28,85 +/- 0,12	28,90 +/- 0,12
Temp. Saída Água Resfriamento (°C)	31,58 +/- 0,14	31,63 +/- 0,13	31,56 +/- 0,12	31,53 +/- 0,12	34,53 +/- 0,12	34,50 +/- 0,12
Vazão Água de Resfriamento (m³/h)	223,6 +/- 5,6	223,7 +/- 5,6	223,4 +/- 5,6	223,5 +/- 5,6	223,8 +/- 5,6	223,7 +/- 5,6
Condições do Compressor/ Motor						
Porcentagem de Corrente (% FLA)	---	---	---	---	100	100
Porcentagem - Inlet Guide Vanes (%)	---	---	---	---	87	89
Frequência no Inversor (Hz)	---	---	---	---	57,0	57,0
Potência Absorvida no Motor (kW)	193,0 +/- 1,4	193,2 +/- 2,5	192,5 +/- 1,2	191,2 +/- 2,4	261,0 +/- 1,1	259,0 +/- 1,4
Porcentagem da Potência Nominal (%)	71,2	71,3	71,0	70,5	96,3	95,6
Condições de Desempenho						
Capacidade do *Chiller* (kW)	884,8 +/- 28,2	886,9 +/- 28,2	880,3 +/- 28,2	878,1 +/- 28,1	1.185,1 +/- 29,5	1.178,8 +/- 29,5
COP (kW/kW)	4,585 +/- 0,115	4,591 +/- 0,121	4,573 +/- 0,115	4,593 +/- 0,121	4,541 +/- 0,089	4,552 +/- 0,090
Capacidade do *Chiller* (ton)	251,6 +/- 8,0	252,2 +/- 8,0	250,3 +/- 8,0	249,7 +/- 8,0	337,1 +/- 8,4	335,2 +/- 8,4

(continua)

Leitura N.	1	2	3	4	5	6
EER (kW/ton)	0,767 +/- 0,019	0,766 +/- 0,020	0,769 +/- 0,019	0,766 +/- 0,020	0,774 +/- 0,015	0,772 +/- 0,015
Calor Rejeitado no Condensador (kW)	1.061,6 +/- 54,5	1.067,5 +/- 52,1	1.048,6 +/- 51,0	1.056,3 +/- 51,2	1.467,6 +/- 57,2	1.447,7 +/- 56,9
Balanço de Energia (%)	1,52	1,17	2,30	1,23	1,46	0,69
Tolerância Limite (%)	7,64	7,63	7,67	7,69	5,76	5,80
Condições do Fluido Refrigerante						
Temperatura de Evaporação (°C)	---	---	---	---	4,5	4,5
Approach no Evaporador (°C)	---	---	---	---	1,10	1,07
Temperatura de Condensação (°C)	---	---	---	---	35,5	35,5
Approach no Condensador (°C)	---	---	---	---	0,97	1,00

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 13 – Teste de Desempenho do CH-03 – Leituras de Dados 7 a 11

Leitura N.	7	8	9	10	11
Data	19/10	19/10	19/10	19/10	19/10
Período	12:00 12:11	12:15 12:26	12:30 12:41	16:25 16:36	16:40 16:51
Porcentagem de Capacidade (%)	84,7	84,7	84,6	77,1	77,5
Condições da Água Gelada					
Temp. Entrada Água Gelada (°C)	12,58 +/- 0,12	12,47 +/- 0,14	12,51 +/- 0,12	11,80 +/- 0,13	11,84 +/- 0,14
Temp. Saída Água Gelada (°C)	5,57 +/- 0,13	5,47 +/- 0,12	5,52 +/- 0,12	5,28 +/- 0,13	5,28 +/- 0,12
Vazão Água Gelada (m³/h)	146,2 +/- 2,4	146,3 +/- 2,1	146,2 +/- 2,3	142,6 +/- 2,1	142,8 +/- 2,1
Condições da Água de Resfriamento					
Temp. Entrada Água Resfriamento (°C)	28,72 +/- 0,12	28,66 +/- 0,12	28,68 +/- 0,12	27,82 +/- 0,12	27,79 +/- 0,12
Temp. Saída Água Resfriamento (°C)	34,33 +/- 0,12	34,32 +/- 0,12	34,32 +/- 0,12	32,99 +/- 0,12	33,00 +/- 0,13
Vazão Água de Resfriamento (m³/h)	223,9 +/- 5,6	223,9 +/- 5,6	223,9 +/- 5,6	222,2 +/- 5,6	222,4 +/- 5,6

(continua)

Leitura N.	7	8	9	10	11
Condições do Compressor/ Motor					
Porcentagem de Corrente (% FLA)	100	100	99	89	91
Porcentagem - Inlet Guide Vanes (%)	87	88	87	83	81
Frequência no Inversor (Hz)	57,0	57,0	57,0	56,0	57,0
Potência Absorvida no Motor (kW)	258,3 +/- 2,6	258,7 +/- 1,9	259,1 +/- 1,6	233,3 +/- 2,8	234,2 +/- 2,6
Porcentagem da Potência Nominal (%)	95,3	95,5	95,6	86,1	86,4
Condições de Desempenho					
Capacidade do *Chiller* (kW)	1.193,2 +/- 30,7	1.193,0 +/- 31,4	1.191,5 +/- 29,5	1.085,2 +/- 30,5	1.091,7 +/- 30,6
COP (kW/kW)	4,619 +/- 0,097	4,611 +/- 0,096	4,599 +/- 0,090	4,652 +/- 0,107	4,662 +/- 0,106
Capacidade do *Chiller* (ton)	339,4 +/- 8,7	339,3 +/- 8,9	339,3 +/- 8,9	308,6 +/- 8,7	310,5 +/- 8,7
EER (kW/ton)	0,761 +/- 0,016	0,763 +/- 0,016	0,764 +/- 0,015	0,756 +/- 0,017	0,754 +/- 0,017
Calor Rejeitado no Condensador (kW)	1.452,4 +/- 57,0	1.462,4 +/- 57,1	1.457,4 +/- 57,0	1.327,8 +/- 54,8	1.339,0 +/- 56,4
Balanço de Energia (%)	0,06	0,73	0,47	0,70	0,98
Tolerância Limite (%)	5,71	5,71	5,72	6,36	6,32
Condições do Refrigerante					
Temperatura de Evaporação (°C)	4,5	4,4	4,5	4,2	4,2
Approach no Evaporador (°C)	1,12	1,07	1,07	1,08	1,08
Temperatura de Condensação (°C)	35,3	35,2	35,3	33,9	34,0
Approach no Condensador (°C)	0,97	0,88	0,98	0,91	1,00

Fonte: Elaboração do autor.

3.8.8 ANÁLISE DOS RESULTADOS – TABELAS E GRÁFICOS COMPARATIVOS

As Tabelas 14 e 15 apresentam os resultados da comparação entre os valores obtidos em campo e os valores estimados em simulação pelo *software* do fabricante, a partir dos dados de cada leitura de campo.

Os valores de campo de capacidade e COP foram obtidos das leituras das Tabelas 12 e 13. Os valores máximos de campo de capacidade e COP se referem ao valor obtido em campo somado ao valor do desvio de erro verificado naquela leitura.

Os valores de capacidade estimada e COP estimado foram obtidos do *software* do fabricante do CH-03 utilizando como dados de entrada os valores de vazão e temperatura de saída da água gelada e vazão e temperatura de entrada de água de resfriamento de cada leitura das Tabelas 12 e 13.

Os valores de capacidade mínima e COP mínimo foram calculados a partir do valor obtido do *software* do fabricante, diminuídos da tolerância limite calculada para cada leitura das Tabelas 12 e 13 (ver equação 4 no item 3.8.5), conforme as seguintes equações:

Capacidade Mínima:

$$Q_{Resf.Min.TL} = Q_{Resf.Estim} - \left(\frac{100 - TL}{100}\right) \quad \textbf{(kW)} \quad \textbf{[5]}$$

COP Mínimo:

$$COP_{Min.TL} = COP_{Estim} - \left(\frac{100 - TL}{100}\right) \quad \textbf{(kW/kW)} \quad \textbf{[6]}$$

Os Gráficos 12 e 13 mostram as curvas comparativas geradas a partir dos dados das Tabelas 14 e 15 classificados a partir da máxima potência (96,3% – Leitura 5)

Nota sobre as tabelas e gráficos comparativos:

- Os valores e curvas em preto foram obtidos das leituras das Tabelas 12 e 13.
- Os valores e curvas em azul foram obtidos da soma do valor obtido da leitura em campo com o desvio de erro daquela leitura.
- Os valores e curvas em verde foram obtidos por meio de simulações de computador utilizando o *software* de selecionamento do fabricante.
- Os valores e curvas em vermelho foram calculados utilizando as equações 5 e 6.

Para um melhor entendimento das tabelas e gráficos comparativos, utilizando os dados da Leitura 5, se o CH-03 estivesse em perfeitas condições, a capacidade estimada deveria ser de 1.410 kW e, devido à tolerância, no mínimo 1.329 kW. No entanto,

Tabela 14 – Comparação de dados de campo do CH-03 com os resultados do *software* do fabricante – Leituras 1 a 6

Leitura N.	1	2	3	4	5	6
Porcentagem da Corrente (%FLA)	71,2	71,3	71,0	70,5	96,3	95,6
Porcentagem da Capacidade Nominal (%)	62,8	63,0	62,5	62,4	84,2	83,7
Capacidade do *Chiller* – Campo (kW)	885 +/- 28,2	887 +/- 28,2	880 +/- 28,2	878 +/- 28,1	1.185 +/- 29,5	1.179 +/- 29,5
Máxima do *Chiller* devido ao Desvio de Erro – Campo (kW)	913	915	908	906	1.215	1.208
Capacidade do *Chiller* – Estimada (kW)	1.034	1.037	1.030	1.021	1.410	1.409
Capacidade Mínima (kW) – Tolerância Limite	955	957	951	942	1.329	1.327
COP – Campo (kW/kW)	4,585 +/- 0,115	4,591 +/- 0,121	4,573 +/- 0,115	4,593 +/- 0,121	4,541 +/- 0,089	4,552 +/- 0,090
COP Máximo do *Chiller* devido ao Desvio de Erro – Campo (kW/kW)	4,700	4,711	4,688	4,714	4,630	4,642
COP – Estimado (kW/kW)	5,943	5,957	5,944	5,942	5,783	5,777
COP Máximo (kW/kW) – Tolerância Limite	5,488	5,503	5,488	5,485	5,450	5,442
Tolerância Limite (%)	7,64	7,63	7,67	7,69	5,76	5,80

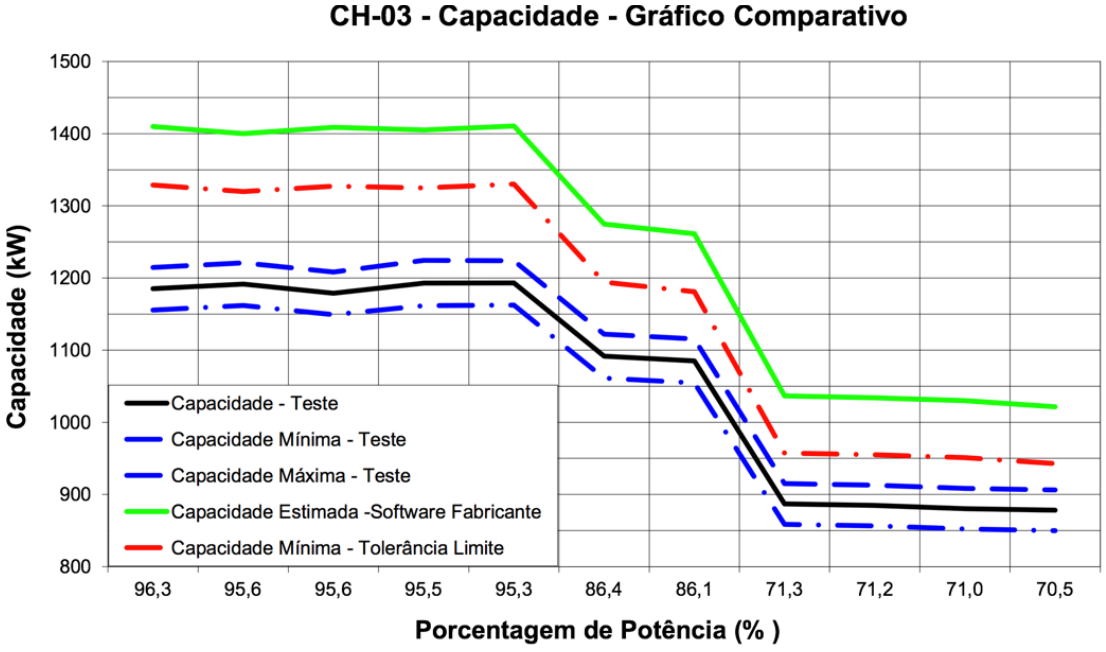
Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 15 – Comparação de dados de campo do CH-03 com os resultados do *software* do fabricante – Leituras 7 a 11

Leitura N.	7	8	9	10	11
Porcentagem da Potência Nominal (%)	95,3	95,5	95,6	86,1	86,4
Porcentagem da Capacidade Nominal (%)	84,7	84,7	84,6	77,1	77,5
Capacidade do *Chiller* – Campo (kW)	1.193 +/- 30,7	1.193 +/- 31,4	1.191 +/- 29,5	1.085 +/- 30,5	1.092 +/- 30,6
Capacidade máxima do *Chiller* devido ao Desvio de Erro – Campo (kW)	1.224	1.224	1.221	1.116	1.122
Capacidade do *Chiller* – Estimada (kW)	1.411	1.405	1.400	1.261	1.275
Capacidade Mínima (kW) – Tolerância Limite	1.330	1.325	1.320	1.181	1.194
COP – Campo (kW/kW)	4,619 +/- 0,097	4,611 +/- 0,096	4,599 +/- 0,090	4,652 +/- 0,107	4,662 +/- 0,106
COP Máximo do *Chiller* devido ao Desvio de Erro – Campo (kW/kW)	4,716	4,707	4,689	4,759	4,768
COP – Estimado (kW/kW)	5,789	5,773	5,776	5,855	5,856
COP Máximo (kW/kW) – Tolerância Limite	5,458	5,443	5,445	5,483	5,486
Tolerância Limite (%)	5,71	5,71	5,72	6,36	6,32

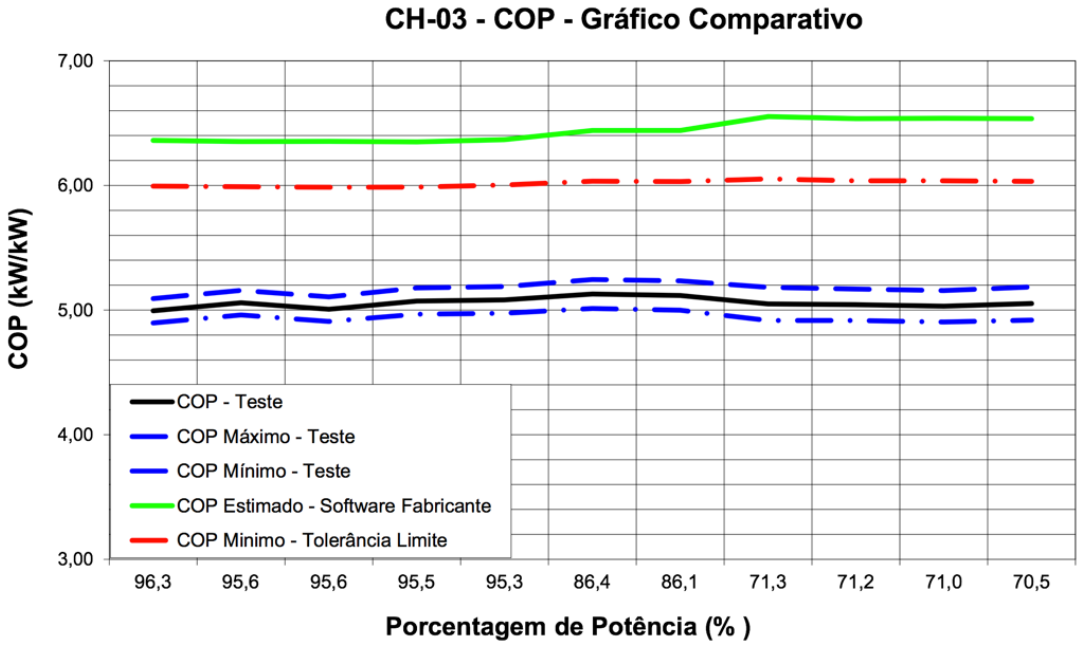
Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 12 – Comparação de dados de campo do CH-03 com os resultados do *software* do fabricante – Capacidade



Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 13 – Comparação de dados de campo do CH-03 com os resultados do *software* do fabricante – COP (Eficiência Energética)



Fonte: Elaboração do autor.

o valor verificado foi de 1.185 kW ou, devido ao desvio de erro, no máximo 1.215 kW.

3.8.9 ANÁLISE DOS RESULTADOS – CONCLUSÕES

Os testes de desempenho realizados no CH-03 indicaram que o *Chiller* não atingiu a capacidade nem o COP estimados nas condições verificadas, com resultados muito aquém dos valores obtidos na simulação.

A capacidade do CH-03 operando na faixa de 100% da corrente nominal ficou em torno de 18% abaixo do estimado e na faixa de 75% da corrente ficou em torno de 16% abaixo.

O COP do CH-03 operando na faixa de 100% da corrente nominal ficou em torno de 26% abaixo do estimado e na faixa de 75% da corrente nominal ficou em torno de 30% abaixo.

Nas condições de operação na faixa de 100%, o *approach* no evaporador estimado em simulação ficou em torno de 1,2 ºC e o valor médio verificado em campo foi de 1,1 ºC.

O *approach* no condensador estimado em simulação ficou em torno de 0,6 ºC e o valor médio verificado em campo foi de 1,0 ºC.

3.8.10 CORREÇÕES NECESSÁRIAS

Após análise do relatório do teste, a equipe de engenharia do fornecedor do *Chiller* foi acionada. Os técnicos realizaram uma análise funcional no equipamento e verificaram os seguintes problemas:

- **Excesso de carga de fluido refrigerante –** A carga de fluido refrigerante foi recolhida e, após pesagem, verificou-se que havia cerca de 70 kg de excesso. Em seguida foi realizada uma nova carga de fluido no *Chiller* com a massa correta;
- **Configuração de controles internos inadequados –** O controlador do inversor de frequência do *Chiller* não estava configurado corretamente. Após os ajustes, o inversor passou a operar de maneira correta;
- **Os *inlet guide vanes* não operavam corretamente –** A faixa de operação estava limitada e a abertura não atingia 100% em carga máxima (FLA), mesmo em condições de operação favo-

ráveis, com temperaturas de condensação menores que os valores da condição de projeto. Foram realizados os ajustes necessários.

- **Baixa tensão na linha –** Foi verificado que a tensão na alimentação do inversor de frequência do motor do *Chiller* estava menor que o valor de projeto (380 V), porém dentro da faixa de tolerância (10%). Com a tensão menor, o *Chiller* atingia 100% de corrente sem atingir 100% da potência nominal do motor e, como consequência, não atingia uma maior capacidade de resfriamento, pois o *Chiller* possui uma limitação operacional de máxima corrente e não de máxima potência. Esse é um problema típico em alguns *Chillers*, que vêm com o valor do *setpoint* de corrente máxima (FLA) configurado de fábrica (sem possibilidade de ajuste em campo). Se por acaso a tensão na entrada for menor que a nominal (ainda que dentro da faixa de tolerância permitida pelo fabricante), o *Chiller* não atingirá a potência de projeto (relativa à FLA) nem a capacidade nominal quando operando em condições próximas às de projeto. Para resolução do problema, como a corrente nominal do motor elétrico era maior que a FLA inicial, foi possível configurar um valor de FLA maior, mas foi necessário substituir um chip com a nova configuração de dados de fábrica.

Ao final das correções, o cliente optou por não realizar um novo teste, pois apenas com uma análise operacional do CH-03 em carga máxima verificou-se uma melhoria significativa no desempenho do equipamento.

3.9 EXEMPLO DE TESTE DE DESEMPENHO FUNCIONAL DE SISTEMA DE ÁGUA GELADA

O teste de desempenho funcional de um sistema de água gelada é parte integrante dos testes integrados do sistema ar condicionado operando sob o controle e monitoração do sistema de automação e, conforme mencionado no item 3.3.2, é uma das principias atividades de campo do processo de comissionamento.

Nos itens 3.9.2 a 3.9.9 é apresentado um exemplo parcial de um relatório de teste funcional de desempenho de um sistema de água gelada realizado, envolvendo as principais rotinas típicas de controle. O objetivo do teste foi verificar o funcionamento da central de água gelada sob o controle do sistema de automação, como parte dos testes integrados de um sistema de ar condicionado.

A seguir, os membros da equipe de teste, com sua função e localização durante a execução do teste:

- Autoridade de comissionamento – coordenação geral dos testes. Posicionado na CAG (central de água gelada), junto aos equipamentos;
- Agente de comissionamento – verificação dos resultados na tela do sistema supervisório, na sala de controle;
- Representante do proprietário – supervisor do sistema de ar condicionado – verificação dos resultados na tela do sistema supervisório, na sala de controle;
- Representante do integrador do sistema de automação – verificação dos resultados na tela do sistema supervisório, na sala de controle;
- Representante do instalador do sistema de ar condicionado – verificação funcionamento dos equipamentos na CAG;
- Operadores de campo do sistema de água gelada – ações de campo sobre os equipamentos na CAG;
- Operador do sistema de automação – ações sobre o sistema supervisório, na sala de controle.

3.9.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ÁGUA GELADA

O sistema de água gelada testado possuía as seguintes características:

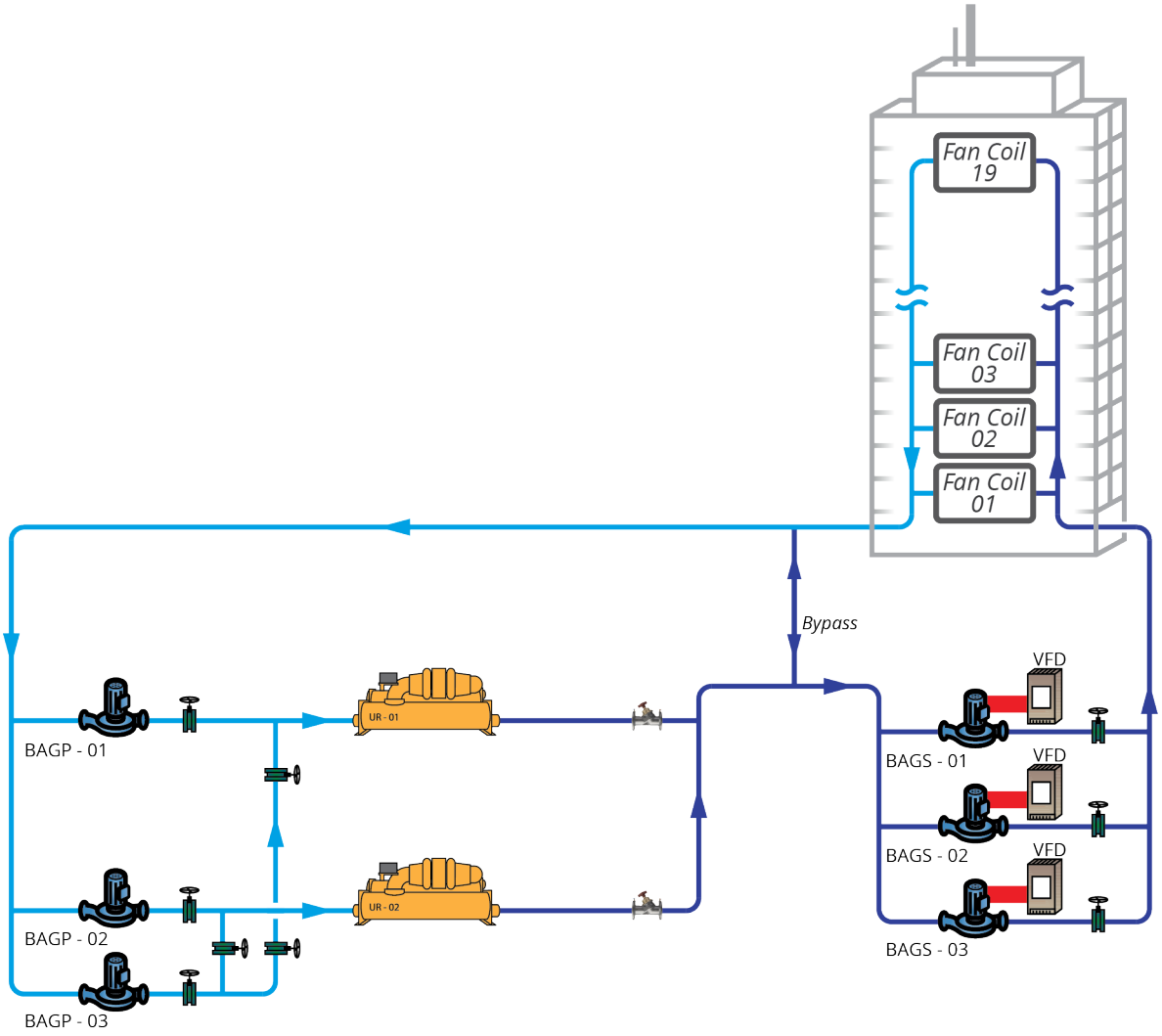
- Sistema com circuito primário e secundário;
- 2 URs – *Chillers* com condensação a água;
- 3 BAGPs – Bombas de água gelada do circuito primário, dedicadas uma para cada *Chiller* em funcionamento e uma reserva;
- 3 BAGSs – Bombas de água gelada do circuito secundário, duas operantes e uma reserva;
- 3 BACs – Bombas de água de resfriamento, com recalque para um barrilete comum (qualquer

BAC atende qualquer *Chiller*), com uma bomba reserva;

- 3 TRs – Torres de resfriamento, cada uma com dois ventiladores (VTRs), com a possibilidade de operar as três torres simultaneamente;
- 3 VBM-URs – Válvulas de bloqueio motorizadas, na tubulação de entrada de água de resfriamento de cada *Chiller*;
- 3 VBM-TRs – Válvulas de bloqueio motorizadas, na tubulação de entrada de água de resfriamento de cada torre.

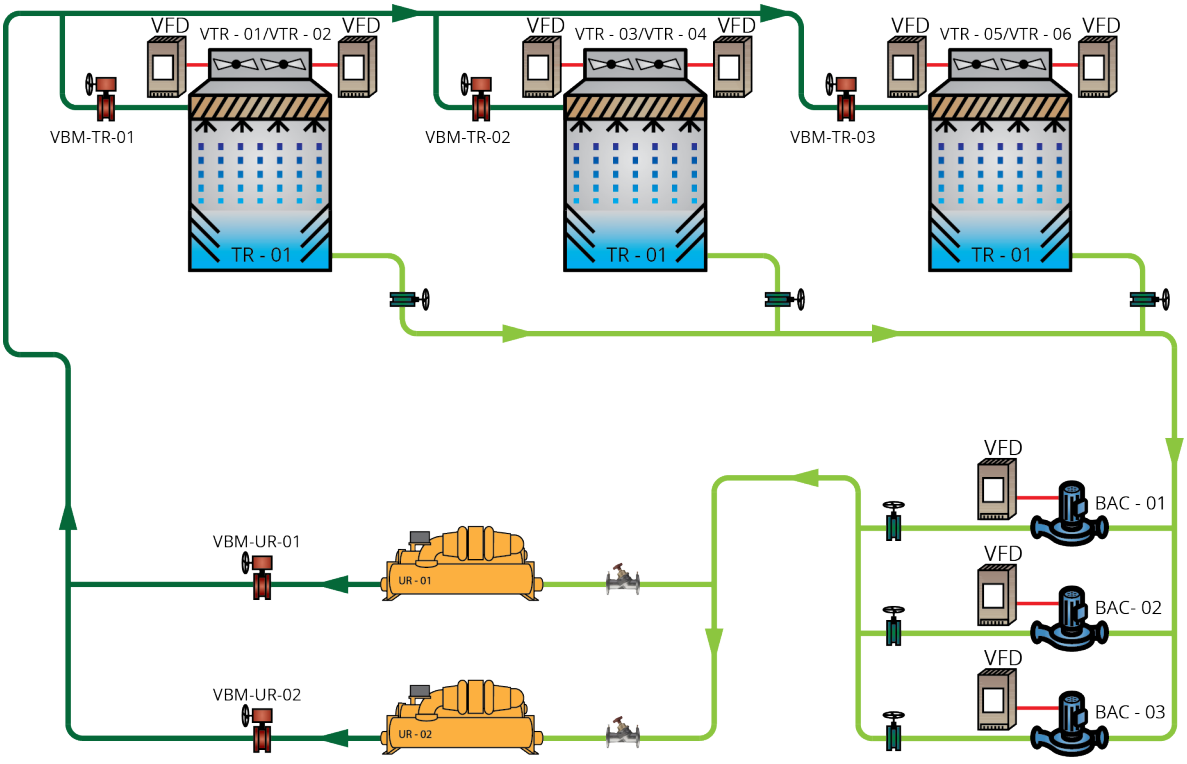
As Figuras 23 e 24 apresentam os fluxogramas básicos dos circuitos de água gelada e do circuito de água de resfriamento do sistema testado.

Figura 23 – Fluxograma esquemático da CAG – Circuitos de Água Gelada



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 24 – Fluxograma esquemático da CAG – Circuito de Água de Resfriamento



Fonte: Elaboração do autor.

3.9.2 PROCEDIMENTOS PARA OS TESTES EM CAMPO

Os testes de desempenho funcional de desempenho do sistema de água gelada foram realizados conforme descrito a seguir:

- A partir das rotinas de teste, foi verificado o funcionamento em modo automático dos equipamentos da CAG, desde a condição de todo o sistema parado até 100% de carga, com os *Chillers* operantes em funcionamento e suas respectivas bombas;
- Em seguida foi verificado o funcionamento em modo automático dos equipamentos da CAG a partir da condição de 100% de carga até a mínima carga;
- Foram verificadas as condições de operação dos equipamentos nas condições normais de operação do sistema e realizadas as leituras dos vários instrumentos do sistema;
- Foram verificados os valores de *setpoint* dos elementos de controle do sistema para funcionamento dos *Chillers*, bombas e torres de resfriamento;
- Foram ainda verificadas as etapas e rotinas do sistema de automação referentes à operação do sistema nas situações de alarme e falha, funcionamento de equipamentos reservas e atuação de dispositivos de proteção;
- Os formulários de testes foram fornecidos previamente pela autoridade de comissionamento aos representantes da empresa integradora do sistema de automação para testes preliminares e ações de correção em caso de desvios. O teste de desempenho funcional tem por objetivo ser um teste funcional e não deve ser confundido com os testes da empresa de automação, nem com sessão de *troubleshooting* para correção de problemas;
- A análise dos resultados de cada item de teste teve como foco os eventos da coluna “Resultados

Esperados", que foram previamente escritos a partir do memorial descritivo das lógicas de controle do sistema de automação (fornecido pela empresa de projeto do sistema de ar condicionado). Outros resultados, ou ações do BMS eventualmente foram verificados, mas não foram considerados relevantes quando não interferiram no resultado do teste;

- Quando em um determinado item de teste, o "Resultado Efetivo" foi diferente do "Resultado Esperado", mas que não resultou em impacto relevante ao funcionamento do sistema e atendeu aos objetivos do teste (ex. o resultado esperado seria o funcionamento uma determinada bomba, mas o resultado efetivo foi a entrada em operação da bomba reserva, porque houve falha na primeira bomba), o teste foi considerado válido;
- Os testes foram executados com todos os equipamentos no modo automático do BMS, exceto quando um comando específico foi previamente requisitado. Portanto, antes do início dos testes todos os comandos em *override* (comandos forçados em modo manual remoto) foram liberados para automático;
- Durante os testes, alguns equipamentos eventualmente entraram em falha/alarme inesperadamente, por problemas elétricos ou mecânicos, não atrelados a uma falha do sistema de automação. Neste caso, se um equipamento reserva entrou em operação e não alterou a sequência do teste, o teste foi considerado válido, com as devidas observações.

O Quadro 3 apresenta uma legenda para melhor entendimento das siglas e abreviações dos termos utilizados nos formulários de testes dos itens 3.9.3 a 3.9.9.

Quadro 3 – Legenda com siglas e abreviações de termos utilizados nos formulários dos testes funcionais de desempenho (itens 3.9.3 a 3.9.9)

Abreviação	Significado	Abreviação	Significado
Ag.Gel	Água Gelada	PC	Painel de Controle do Equipamento
Ag.Resf	Água de Resfriamento	ReqStrt	Solicitação de Partida (Funcionamento)
Alim	Alimentação	ReqStp	Solicitação de Parada
Alrm	Alarme	Ret	Retorno
BAC	Bomba de Água de Resfriamento	SEQ	Sequência de Partida
BAGP	Bomba de Água Gelada - Primária	Set	Ajuste de valor de entrada
BAGS	Bomba de Água Gelada - Secundária	SP	*setpoint*
BMS	Sistema de Automação	$T_{Ag.Gel}$	Temperatura de Água Gelada
Cap	Capacidade (%)	$T_{Ag.Resf}$	Temperatura de Água Resfriamento
Carga	Carga Térmica do Sistema	$TBS_{Ar.UM}$	Temperatura do Ar Externo (Bulbo Úmido)
Cmd	Comando	Temp	Temperatura

(continua)

Abreviação	Significado	Abreviação	Significado
Ctrl	Controle	Tq-Exp	Tanque de Expansão
DI	Entrada Digital	$V_{Ag.Gel}$	Vazão de Água Gelada
DO	Saída Digital	VBM	Válvula de Bloqueio Motorizada
$DP_{Ag.Gel}$	Diferencial de Pressão – Circuito de Água Gelada	V2V	Válvula de 2 Vias de Controle de Vazão de Água nos *Fan Coils*
Falha	Falha (*Shutdown*)	VBM-UR	Válvula de Bloqueio Motorizada em *Chiller*
Hz	Frequência (*Hertz*)	VBM-UR	Válvula de Bloqueio Motorizada em Torre de Resfriamento
Min	Minutos	VFD	Inversor de Frequência
OFF	Parado; Desligado; Valv. Fechada (0%); Contato Aberto	VTR	Ventilador Torre de Resfriamento
ON	Em funcionamento – Normal Ligado; Valv. Aberta (100%); Contato Fechado	UR	*Chiller*

Fonte: Elaboração do autor.

A seguir, os formulários de testes preenchidos com os resultados verificados em campo.

3.9.3 SEQUÊNCIA DE ENTRADA EM OPERAÇÃO DOS *CHILLERS*

O objetivo dos testes foi verificar a sequência de entrada em operação dos *Chillers* (rotinas de partida e parada) juntamente com os demais equipamentos e elementos necessários para o funcionamento adequado dos *Chillers* em modo automático.

Quadro 4 – Teste 1

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
Teste 1. **Início de Operação da CAG** **Partida do 1° Grupo** ► Set PC-URs - Cmd Ctrl - Remoto ► Set – PC-BAGSs – Auto ► Set – PC-BACs – Auto ► Set – VBA-URs – Auto ► Set – VBA-TRs – Auto ► Set – VTRs - Auto ► Set %FLA_{Max} UR-01= 100% ► Set %FLA_{Max} UR-02= 100% ► Set SEQ: URs: 01/02 BAGPs: 01/02/03 BAGSs: 02/03/01 BACs: 03/01/02 TRs: 01/02/03 ► SP: $T_{Ag.Gel}$ = 6,0 °C ► BMS sem Alrm na CAG: ► Set Habilita Cmd da CAG. ► Set Habilita Partida das URs. ► Set *Fan Coils* = Auto ► Set Carga < 3.500 kW	► DO: Comando horário ou manual iniciar CAG	x		
	► $T_{Ag.Gel-Alim}$ > 6,5 °C	x		8 °C
	► DO: Cmd ReqStrt BAGP-01 Status: **ON**. Posição VFD-BAGP-01: 57 Hz	x		
	► DO: Cmd ReqStrt BAC-03 Status: **ON**. ► Posição VFD-BAC-03: 44 Hz	x		
	► DO: Cmd Abre VBM-UR-01 Status: **ON**. ► Posição VBM-UR-01: 100 %	x		
	► DO: Cmd Abre VBM-TR-01 Status: **ON**. ► Posição VBM-TR-01: 100 %	x		
	► SP V $_{Ag.Resf}$ = 505 m³/h ► $V_{Ag.Resf-UR-01}$ = 501 m³/h ► Posição VFD-BAC-03: 44 Hz	x		
	► DO: Cmd ReqStrt - UR-01 ► PC-UR-01: DI: Cmd ReqStrt	x		Após 30 s
	► UR-01 entra em funcionamento. Status: **ON**	x		
	Medições em Campo		**Observações**	
	► UR-01 modula Cap: 100 %.		W= 578 kW	
	► $T_{Ag.Gel-Ent-UR-01}$ = 14,0 °C ► $T_{Ag.Gel-Sai-UR-01}$ = 7,0 °C			
	► $V_{Ag.Gel-UR-01}$ = 501 m3/h			
	► $T_{Ag.Resf-Ent-UR-01}$ = 23,7 °C ► $T_{Ag.Resf-Sai-UR-01}$ = 31,5 °C			
	► $V_{Ag.Resf-UR-01}$= 505 m3/h			
	► Posição VFD-BAGP-01: 57 Hz			
	► Posição VFD-BAC-03: 55 Hz			

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 5 – Teste 2

Ajustes/Condições	Medições em Campo	Observações
Teste 2. **Aumento de Carga no Sistema** ► Mesmos Parâmetros do Teste 01. ► Set Carga > 3.500 kW	► UR-01 modula Cap: 100 %.	
	► $T_{Ag.Gel\text{-}Ent\text{-}UR\text{-}01}$ = 14,0 °C ► $T_{Ag.Gel\text{-}Sai\text{-}UR\text{-}01}$ = 7,2 °C	
	► $V_{Ag.Gel\text{-}UR\text{-}01}$ = 501 m ^{3}/h	
	► $V_{Ag.Resf\text{-}UR\text{-}01}$ = 511 m ^{3}/h	
	► $T_{Ag.Resf\text{-}Ent\text{-}UR\text{-}01}$ = 25,0 °C ► $T_{Ag.Resf\text{-}Sai\text{-}UR\text{-}01}$ = 32,3 °C	
	► FLA $_{UR\text{-}01}$ > 90% e ► $T_{Ag.Gel\text{-}Alim}$ > 6,5 °C por 10 min ou ► FLA $_{UR\text{-}01}$ > 97% por 5 min	FLA $_{UR\text{-}01}$> 97% por 5 min

Outros Resultados	Sim	Não	Observações
► Solicita novo *Chiller*?	x		

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 6 – Teste 3

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
Teste 3. **Partida do 2º Grupo** ► Mesmos Parâmetros do Teste 01. ► Set Carga > 3.500 kW	► $T_{Ag.Gel\text{-}Alim}$ > 6,5 °C	x		
	► DO: Cmd Liga BAGP-02 Status: **ON**. ► Posição VFD-BAGP-02: 57 Hz	x		
	► DO: Cmd ReqStrt BAC-01 Status: **ON**. ► Posição VFD-BAC-01: 50 Hz	x		
	► DO: Cmd Abre VBM-UR-02 Status: **ON**. ► Posição VBM-UR-02: 100%	x		
	► DO: Cmd Abre VBM-TR-02 Status: **ON**. ► Posição V22-TR-02: 100%	x		
	► SP V $_{Ag.Resf}$ = 1.010 m³/h ► $V_{Ag.Resf\text{-}UR\text{-}01}$ = 505 m³/h ► Posição VFD-BAC-03: 56,1 Hz ► $V_{Ag.Resf\text{-}UR\text{-}02}$ = 506 m³/h ► Posição VFD-BAC-01: 56,1 Hz			
	► DO: Cmd ReqStrt - UR-02 ► PC-UR-02: DI: Cmd ReqStrt	x		Após 30 segundos

(continua)

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
	► UR-02 entra em funcionamento. Status: **ON**.	x		
	Medições em Campo		**Observações**	
	► UR-01 modula Cap: 99%.		W= 578 kW	
	► TAg.Gel-Ent-UR-01 = 13,8 °C ► TAg.Gel-Sai-UR-01 = 7,1 °C			
	► VAg.Gel-UR-01 = 505 m3/h			
	► TAg.Resf-Ent-UR-01 = 26,0 °C ► TAg.Resf-Sai-UR-01 = 33,7 °C			
	► VAg.Resf-UR-01 = 509 m3/h			
	► UR-02 modula Cap: 94%.		W= 552 kW	
	► TAg.Gel-Ent-UR-02 = 13,6 °C ► TAg.Gel-Sai-UR-02 = 7,4 °C			
	► VAg.Gel-UR-02 = 516 m3/h			
	► TAg.Resf-Ent-UR-02 = 26,1 °C ► TAg.Resf-Sai-UR-02 = 33,3 °C			
	► VAg.Resf-UR-02 = 505 m3/h			
	► Posição VFD-BAGP-01: 57,0 Hz ► Posição VFD-BAGP-02: 57,0 Hz			
	► Posição VFD-BAC-03: 56,1 Hz ► Posição VFD-BAC-01: 56,1 Hz			

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 7 – Teste 4

Ajustes/Condições	Medições em Campo			
	► UR-01 modula Cap: 71 %.			
	► $T_{Ag.Gel-Ent-UR-01}$ = 9,3 °C ► $T_{Ag.Gel-Sai-UR-01}$ = 5,0 °C			
	► $V_{Ag.Gel-UR-01}$ = 503 m³/h			
	► $V_{Ag.Resfr-UR-01}$ = 515 m³/h			
	► UR-02 modula Cap: 67 %			
	► $T_{Ag.Gel-Ent-UR-02}$ = 9,3 °C ► $T_{Ag.Gel-Sai-UR-02}$ = 5,1 °C			
	► $V_{Ag.Gel-UR-02}$ = 513 m³/h			
	► $V_{Ag.Resfr-UR-02}$ = 511 m³/h			
	► Posição VFD-BAC-03/01: 51 Hz			
	► Posição VFD-BAGP-01: 57 Hz			
	► Posição VFD-BAGP-02: 60 Hz			
Teste 4. **Parada do 2º grupo** • Mesmos Parâmetros do Teste 01. • Set Carga < 3.500 kW • Set FLA $_{Min}$ = 75 %	**Resultados Esperados**	**Sim**	**Não**	**Resultado Efetivo**
	► DO: Cmd ReqStop - UR-02 ► PC-UR-02: DI: Cmd ReqStop	x		
	Após 30s - UR-02 – **OFF**	x		
	► DO: Cmd Fecha VBM-UR-02 Após 30 s VBM-UR-02 **OFF**	x		
	► DO: Cmd ReqStop BAC-02 Status: **OFF.** ► Posição VFD-BAC-02: 0 Hz	x		
	► DO: Cmd ReqStop BAGP-04 Status: **OFF.** ► Posição VFD-BAGP-04: 0 Hz	x		
	► DO: Cmd Fecha VBM-TR-02 Status: **OFF.** ► Posição VBM-TR-02: 0%	x		
	► SP $V_{Ag.Resf}$ = 505 m³/h ► $V_{Ag.Resf-UR-01}$= 505 m³/h ► Posição VFD-BAC-03: 50 Hz	x		
	Outros Resultados	**Sim**	**Não**	**Observações**
	► VTR-03/ VTR-04 OFF?	x		

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 8 – Teste 5

Ajustes/Condições	Medições em Campo			
	► UR-01 modula Cap: 50 %.			
	► $T_{Ag.Gel-Ent-UR-01}$ = 11,1 °C ► $T_{Ag.Gel-Sai-UR-01}$ = 5,0 °C			
	► $V_{Ag.Gel-UR-01}$ = 501 m³/h ► $V_{Ag.Resfr-UR-01}$ = 500 m³/h			
	Resultados Esperados	**Sim**	**Não**	**Resultado Efetivo**
	► DO: Cmd ReqStop - UR-01 ► PC-UR-01: DI: Cmd ReqStop	x		
Teste 5. **Parada Normal do 1º grupo** ► Mesmos Parâmetros do Teste 01. ► Set Carga < 100 kW ► Set FLA $_{Min}$ = 55 %	Após 30s - UR-01 – **OFF**	x		
	► DO: Cmd Fecha VBM-UR-01 ► Após 30s VBA-UR-01 **OFF**	x		
	► DO: Cmd ReqStop BAC-03 Status: **OFF.** ► Posição VFD-BAC-03: 0 Hz	x		
	► BAGP-05 em funcionamento Status: **ON**	x		
	► DO: Cmd Fecha VBM-TR-01 Status: **OFF.** ► Posição VBM-TR-01: 0%	x		TR-01 e TR-03 estavam em funcionamento e foram desligadas.
	► SP V $_{Ag.Resf}$ = 0 m³/h ► $V_{Ag.Resf-UR-01}$= 0 m³/h	x		
	Outros Resultados	**Sim**	**Não**	**Observações**
	► VTR-01/ VTR-02 OFF?	x		

Fonte: Elaboração do autor.

Os resultados dos testes indicaram que a sequência de operação dos *Chillers*, envolvendo as rotinas de controle de partida e parada dos equipamentos estava de acordo com os requisitos da lógica de controle do sistema.

3.9.4 CONTROLE DE TEMPERATURA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO

Nestes testes foram verificadas a sequência de entrada em operação e a lógica de controle de frequência dos inversores dos ventiladores das torres de resfriamento para manter a temperatura de saída de água de resfriamento das torres para os *Chillers* conforme o valor do *setpoint*. Neste sistema, os dois ventiladores de cada torre foram configurados para entrar em operação simultaneamente e funcionar sempre na mesma frequência.

Quadro 9 – Teste 6

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
Teste 6. **Controle Temperatura –** **1º Grupo em Funcionamento.** ► Set SEQ: URs: 01/02 BAGPs: 01/02/03 BAGSs: 02/03/01 BACs: 02/03/01 TRs: 02/03/01 ► $SPT_{Ag.Res\text{-}Sai\text{-}Torres}$ = TBU+3 °C SP_{Atual} = 25,3 °C ► UR-01 Ligado ► BAC-02 Ligada ► VBM-TR-02 Aberta ► VTR-03 Desligado ► VTR-04 Desligado	► $T_{Ag.Res\text{-}Sai\text{-}Torres}$ > SP_{atual} +0,5 °C	x		Não foi habilitado um temporizador para a 1ªTR na sequência.
	► DO: Cmd ReqStrt VTR-03 Status: **ON**. ► Posição VFD-VTR-03: 60 Hz	x		
	► DO: Cmd ReqStrt VTR-04 Status: **ON**. ► Posição VFD-VTR-04: 60 Hz	x		
	Medições em Campo		**Observações**	
	► UR-01 modula Cap: 87 %.			
	► $T_{Ag.Resf\text{-}Ent\text{-}Torres}$ = 33,1 °C			
	► $T_{Ag.Resf\text{-}Sai\text{-}Torres}$ = 26,9 °C			

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 10 – Teste 7

Ajustes/Condições	Medições em Campo			Observações
Teste 7. **Aumento de Carga** **Torre não atinge SP** ► Mesmos Parâmetros do Teste 6. ► UR-01 Ligado ► BAC-02 Ligada ► VBM-TR-02 Aberta ► VTR-03 Ligado ► VTR-04 Ligado	► UR-01 modula Cap: 95 %.			
	► $T_{Ag.Resf\text{-}Ent\text{-}Torres}$ = 33,3 °C			
	► $T_{Ag.Resf\text{-}Sai\text{-}Torres}$ = 26,7 °C			
	► $T_{Ag.Res\text{-}Sai\text{-}Torres}$ > SP_{Atual} + 0,5 °C			
	► Posição VFD-VTR-03: 60 Hz ► Posição VFD-VTR-04: 60 Hz ► Por 150 s			
	Outros Resultados	**Sim**	**Não**	**Observações**
	► Solicita novo *Chiller*?		x	
	► Solicita nova Torre?	x		

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 11 – Teste 8

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
Teste 8. **Controle Temperatura – 1ºGrupo em Funcionamento. Partida da 2ªTR** ► Mesmos Parâmetros do Teste 6. ► SP_{Atual} = 25,1 ºC ► UR-01 Ligado ► BAC-02 Ligada ► VBM-TR-02 Aberta ► VTR-03 Ligado ► VTR-04 Ligado	► DO: Cmd Abre VBM-TR-03 Status: **ON.** ► Posição VBM-TR-03: 100%	x		
	► DO: Cmd ReqStrt VTR-05 Status: **ON.** ► Posição VFD-VTR-05: 60 Hz	x		
	► DO: Cmd ReqStrt VTR-06 Status: **ON.** ► Posição VFD-VTR-06: 60 Hz	x		
	Medições em Campo		**Observações**	
	► UR-01 modula Cap: 100 %.			
	► $T_{Ag.Resf-Ent-Torres}$ = 32,1 ºC			
	► $T_{Ag.Resf-Sai-Torres}$ = 25,1 ºC			
	► Posição VFD-VTR-03: 55 Hz ► Posição VFD-VTR-04: 56 Hz			
	► Posição VFD-VTR-05: 55 Hz ► Posição VFD-VTR-06: 55 Hz			

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 12 – Teste 9

Ajustes/Condições	Medições em Campo		Observações	
Teste 9. **Controle Temperatura – Aumento de Carga no Sistema** ► Mesmos Parâmetros doTeste 6. ► UR-01 Ligado ► BAC-02 Ligada ► VBM-TR-02 Aberta ► VTR-03 Ligado ► VTR-04 Ligado ► VBM-TR-03 Aberta ► VTR-05 Ligado ► VTR-06 Ligado	► UR-01 modula Cap: 100%.			
	► $T_{Ag.Resf-Ent-UR-01}$ = 25,3 ºC ► $T_{Ag.Resf-Sai-UR-01}$ = 32,5 ºC			
	Outros Resultados	**Sim**	**Não**	**Observações**
	► Solicita novo *Chiller*?	**x**		
	► Solicita nova Torre?	**x**		

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 13 – Teste 10

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
Teste 10. **Controle Temperatura – Partida 2ºUR.** ► Mesmos Parâmetros do Teste 6. ► SP_{Atual} = 23,7 °C ► UR-01 Ligado ► BAC-02 Ligada ► VBM-TR-02 Aberta ► VTR-03 Ligado ► VTR-04 Ligado ► VBM-TR-03 Aberta ► VTR-05 Ligado ► VTR-06 Ligado	► DO: Cmd ReqStrt - UR-02 ► PC-UR-02: DI: Cmd ReqStrt	x		
	► UR-02 entra em funcionamento. Status: **ON**.	x		
	Medições em Campo		**Observações**	
	► UR-01 modula Cap: 83 %.			
	► UR-02 modula Cap: 85 %.			
	► $T_{Ag.Resf\text{-}Ent\text{-}Torres}$ = 33,0 °C			
	► $T_{Ag.Resf\text{-}Sai\text{-}Torres}$ = 26,3 °C			
	► Posição VFD-VTR-03: 60 Hz ► Posição VFD-VTR-04: 60 Hz			
	► Posição VFD-VTR-05: 60 Hz ► Posição VFD-VTR-06: 60 Hz		Solicitou a Entrada da 3ªTR na sequência de partida – TR-01.	

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 14 – Teste 11

Ajustes/Condições	Medições em Campo		Observações	
Teste 11. **Controle Temperatura – Redução de Carga no Sistema** ► Mesmos Parâmetros do Teste 6. ► SP_{Atual} = 23,9 °C ► Set FLA_{Min} = 60 % ► UR-01 Ligado ► UR-02 Ligado ► BAC-02 Ligada ► BAC-03 Ligada ► VBM-TR-02 Aberta ► VTR-03 Ligado ► VTR-04 Ligado ► VBM-TR-03 Aberta ► VTR-05 Ligado ► VTR-06 Ligado ► VBM-TR-01 Aberta ► VTR-01 Ligado ► VTR-02 Ligado	► UR-01 modula Cap: 57 %.			
	► $T_{Ag.Resf\text{-}Ent\text{-}UR\text{-}01}$ = 25,3 °C ► $T_{Ag.\ Resf\text{-}Sai\text{-}UR\text{-}01}$ = 29,7 °C			
	► UR-02 modula Cap: 53 %.			
	► $T_{Ag.Resf\text{-}Ent\text{-}UR\text{-}02}$ = 25,2 °C ► $T_{Ag.\ Resf\text{-}Sai\text{-}UR\text{-}02}$ = 29,5 °C			
	Outros Resultados	**Sim**	**Não**	**Observações**
	► Solicita novo *Chiller*?	x		
	► Solicita Parada da Torre?	x		Solicitou a parada dos VTRs da TR-01 e o fechamento da VBM-TR-01

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 15 – Teste 12

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
Teste 12. **Controle Temperatura – Parada 2º UR.** ► Mesmos Parâmetros do Teste 6. ► SP_{Atual} = 23,2 ºC ► ► UR-01 Ligado ► UR-02 Ligado ► BAC-02 Ligada ► BAC-03 Ligada ► VBM-TR-02 Aberta ► VTR-03 Ligado ► VTR-04 Ligado ► VBM-TR-03 Aberta ► VTR-05 Ligado ► VTR-06 Ligado ► VBM-TR-01 Aberta ► VTR-01 Ligado ► VTR-02 Ligado	► DO: Cmd ReqStop- UR-02 ► PC-UR-02: DI: Cmd ReqStop	x		
	► Após 30 segundos - UR-02 – **OFF**	x		
	► DO: Cmd ReqStop BAC-03 ► Status: **OFF .** ► Posição VFD-BAC-03: 0 Hz	x		
	► DO: Cmd Fecha VBM-TR-01 ► Após 30 segundos ► VBM-TR-01 **OFF**	x		
	► DO: Cmd ReqStop VTR-01 ► Status: **OFF .** ► Posição VFD-VTR-01: 0 Hz	x		
	► DO: Cmd ReqStop VTR-02 ► Status: **OFF .** ► Posição VFD-VTR-02:0 Hz	x		
	Medições em Campo		**Observações**	
	► UR-01 modula Cap: 100%.			
	► $T_{Ag.Resf\text{-}Ent\text{-}Torres}$ = 32,3 ºC			
	► $T_{Ag.Resf\text{-}Sai\text{-}Torres}$ = 25,1 ºC			
	► Posição VFD-VTR-03: 60 Hz ► Posição VFD-VTR-04: 60 Hz			
	► Posição VFD-VTR-05: 60 Hz ► Posição VFD-VTR-06: 60 Hz			

Fonte: Elaboração do autor.

Os resultados dos testes indicaram que a sequência de entrada em operação envolvendo as rotinas de partida e parada dos equipamentos e a lógica de controle de frequência dos inversores dos ventiladores das torres de resfriamento para manter a temperatura de saída de água das torres estavam de acordo com os requisitos da lógica de controle do sistema.

3.9.5 CONTROLE DAS BAGSs

Nos testes de controle das BAGSs foram verificadas a sequência de entrada em operação e a lógica de controle de frequência dos inversores das bombas de água gelada do circuito secundário para manter o diferencial de pressão no final do circuito secundário conforme o valor do *setpoint* de controle. Com duas BAGSs em funcionamento, a frequência nos inversores deve ser a mesma.

Quadro 16 – Teste 13

Ajustes/Condições	Medições em Campo			Observações
Teste 13. **Partida 2ª BAGS** ► Set SEQ: URs: 01/02 BAGPs: 01/02/03 BAGSs: 03/01/02 ► UR-01 Ligado ► BAGS-03 Ligada ► SP: $T_{Ag.Gel}$ = 6,0°C $DP_{AG.GEL\ CIRC-SEC}$= 150kPa ► Solicitar a abertura em *override* das válvulas de 2 vias dos *Fan Coils* até que o diferencial de pressão fique abaixo do *setpoint*.	► Posição VFD-BAGS-03: 53 Hz ► $DP_{AG.GEL\ CIRC-SEC}$ = 145 kPa ► $V_{CIRC-SEC}$ = 453 m³/h			
	Outros Resultados	**Sim**	**Não**	**Observações**
	► Aumento da % abertura nas V2V – *Fan Coils*	x		
	► Redução no valor do $DP_{Ag.Gel}$ ► $DP_{AG.GEL\ CIRC-SEC}$ = 130 kPa	x		
	► Posição VFD-BAGS-03: 60 Hz	x		
	► Após 300 s ► DO: Cmd ReqStrt BAGS-01 Status: **ON**. ► Posição VFD-BAGS-01: 60 Hz	x		
	Medições em Campo			**Observações**
	► Posição VFD-BAGS-03: 37 Hz ► Posição VFD-BAGS-01: 37 Hz ► $DP_{AG.GEL\ CIRC-SEC}$ = 141 kPa ► $V_{CIRC-SEC}$ = 527 m³/h			

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 17 – Teste 14

Ajustes/Condições	Medições em Campo			Observações
Teste 14. **Diminuição de Carga no Sistema - Parada da 2ª BAGS** ► Mesmos parâmetros que o Teste 13. ► UR-03 Ligado ► BAGS-03 Ligada ► BAGS-01 Ligada ► SP: $T_{Ag.Gel}$ = 5,0°C $DP_{AG.GEL\ CIRC-SEC}$= 150 kPa	► Posição VFD-BAGS-03: 33 Hz ► Posição VFD-BAGS-01: 33 Hz ► $DP_{AG.GEL\ CIRC-SEC.}$= 153 kPa ► $V_{CIRC-SEC}$ = 511 m³/h			
	Resultados Esperados	**Sim**	**Não**	**Observações**
	► Redução da % abertura nas V2V – *Fan Coils*	x		
	► Aumento no valor do DP ► $DP_{AG.GEL\ CIRC-SEC}$ = 163 kPa	x		
	► Posição VFD-BAGS-03: 33 Hz		x	Alterado o *setpoint* de desligamento para 35Hz
	► Posição VFD-BAGS-01: 33 Hz		x	
	► Após 300 segundos ► DO: Cmd ReqStop BAGS-01 ► Status: **OFF**. ► Posição VFD-BAGS-01: 0 Hz	x		

(continua)

Ajustes/Condições	Medições em Campo		Observações	
► Solicitar o fechamento em *override* das válvulas de 2 vias dos *Fan Coils* até que o diferencial de pressão fique acima do *setpoint*.	**Outros Resultados**	**Sim**	**Não**	**Observações**
	► Grupo do UR-03 OFF?		x	
	Medições em Campo		**Observações**	
	► Posição VFD-BAGS-03: 60 Hz ► DP $_{AG.GEL\ CIRC\text{-}SEC}$ = 145 kPa ► $V_{CIRC\text{-}SEC}$ = 467 m³/h			

Fonte: Elaboração do autor.

Os resultados dos testes indicaram que a sequência de entrada em operação envolvendo as rotinas de partida e parada dos equipamentos e a lógica de controle de frequência dos inversores das bombas de água gelada do circuito secundário para manter o diferencial de pressão no final do circuito secundário estavam de acordo com os requisitos da lógica de controle do sistema.

3.9.6 FALHAS NOS EQUIPAMENTOS – BOMBAS

O objetivo dos testes de falhas nas bombas foi verificar as mensagens de alarme e falha nas telas do sistema de supervisão e nos painéis locais dos equipamentos. Além disso, foi verificado o acionamento da próxima bomba na sequência de partida.

Quadro 18 – Teste 15

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
Teste 15. **Falha em Bomba (BAC)** **Com 2 URs em funcionamento** ► Set SEQ: URs: 02/01 BACs: 02/03/01 ► UR-02 Ligado ► UR-01 Ligado ► BAC-02 Ligada ► BAC-03 Ligada ► **Set Falha BAC-02**	► Falha – BAC-02 ► Msg – Falha BAC-02 ► BAC-02 – Status: **OFF - Falha**	x		
	► DO: Cmd ReqStrt BAC-01 ► Status: **ON** ► Posição VFD-BAC-01: 55 Hz	x		
	Outros Resultados	**Sim**	**Não**	**Observações**
	► Msg Falha na tela do BMS?	x		
	► UR-01 OFF - Falha?		x	
	► UR-02 OFF - Falha?		x	
	► VTRs OFF?		x	
	OBS: Não realizar *reset* de falhas			

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 19 – Teste 16

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
Teste 16. **Falha em Bomba (BAC)** **Com 2 URs em funcionamento** ► Mesmos parâmetros que o Teste 15. ► UR-02 Ligado ► UR-01 Ligado ► BAC-03 Ligada ► BAC-01 Ligada ► BAC-02 em Falha ► **Set Falha BAC-03**	► Falha – BAC-03 ► Msg – Falha BAC-03 ► BAC-03 – Status: **OFF - Falha**	x		
	Outros Resultados	**Sim**	**Não**	**Observações**
	► Msg Falha na tela do BMS?	x		
	► UR-01 OFF - Falha?	x		Falha na BAC 2°UR
	► UR-02 OFF - Falha?	x		Falta de Fluxo
	► BAC-01 OFF?	x		
	► VTRs OFF?	x		Após o *reset* de falha de fluxo (automático), o UR-02 voltou a funcionar com a BAC-01
	Após Teste 16, realizar *reset* de todos os alarmes e falhas			

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 20 – Teste 17

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
Teste 17. **Falha em Bomba (BAGP)** **Com 1 UR em funcionamento** ► Set SEQ: URs: 01/02 BAGPs: 01/02/03 BACs: 01/02/03 TRs: 02/03/01 ► UR-01 Ligado ► BAGP-01 Ligada ► BAC-01 Ligada ► TR-02 Ligada ► **Set Falha BAGP-03**	► Falha – BAGP-01 ► Msg – Falha BAGP-011 ► BAGP-01 – Status: **OFF - Falha**	x		
	► DO: Cmd ReqStop - UR-01 ► PC-UR-01: DI: Cmd ReqStop	x		
	► Após 7s - UR-01 – Status: **OFF Falha**	x		Falta de Fluxo
	► DO: Cmd Fecha VBM-UR-01 ► Após 30 s VBM-UR-01 **OFF**	x		
	► DO: Cmd ReqStop BAC-01 ► Status: **OFF** ► Posição VFD-BAC-01: 0 Hz	x		
	► DO: Cmd Fecha VBM-TR-02 ► Status: **OFF.** ► Posição VBM-TR-02: 0%	x		
	► DO: Cmd ReqStrt BAGP-02 ► Status: **ON.** ► Posição VFD-BAGP-02: 57 Hz	x		

(continua)

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
	▸ DO: Cmd ReqStrt BAC-01 ▸ Status: **ON.** ▸ Posição VFD-BAC-01: 50 Hz	x		
	▸ DO: Cmd Abre VBM-UR-02 ▸ Status: **ON.** ▸ Posição VBM-UR-02: 100%	x		
	▸ DO: Cmd Abre VBM-TR-02 ▸ Status: **ON.** ▸ Posição VBM-TR-02: 100%	x		
	▸ DO: Cmd ReqStrt - UR-02 ▸ PC-UR-02: DI: Cmd ReqStrt	x		Após 30 s
	▸ UR-02 entra em funcionamen - to. Status: **ON.**	x		
	Outros Resultados	**Sim**	**Não**	**Observações**
	▸ Msg Falha na tela do BMS?	x		
	▸ UR-01 OFF - Falha?		x	Parada por falta de fluxo → reset automático
	▸ VTRs OFF?	x		
	Após Teste 17 realizar *reset* de todos os alarmes e falhas			

Fonte: Elaboração do autor.

Os resultados dos testes indicaram que as mensagens de alarme e falha nas telas do sistema de supervisão, e o acionamento da próxima bomba na sequência de partida estavam de acordo com os requisitos da lógica de controle do sistema.

3.9.7 FALHAS NOS EQUIPAMENTOS – *CHILLERS*

O objetivo dos testes de falhas nos *Chillers* foi verificar as mensagens de alarme e falha nas telas do sistema de supervisão e nos painéis locais dos equipamentos. Além disso, foi verificado o acionamento do próximo *Chiller* na sequência de partida.

Quadro 21 – Teste 18

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
Teste 18. **Falha em *Chiller*** **Com 1 UR em funcionamento**	▸ Falha – UR-02 ▸ Msg – Falha UR-02 ▸ UR-02 – Status: **OFF - Falha**	x		
	▸ DO: Cmd Fecha VBM-UR-02 ▸ Após 20 s VBM-UR-02 **OFF**	x		

(continua)

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
► Set SEQ: ► URs: 02/01 ► BACs: 01/02/03 ► BAGPs: 02/01/03 ► UR-02 Ligado ► BAGP-03 Ligada ► BAC-01 Ligada ► TR-01 Ligada ► TR-02 Ligada ► **Set Falha UR-02**	► DO: Cmd Fecha VBM-UR-02 ► Após 20 s VBM-UR-02 **OFF**	x		
	► DO: Cmd ReqStop BAC-01 Status: **OFF.** ► Posição VFD-BAC-01: 0 Hz	x		
	► DO: Cmd ReqStop BAGP-02 Status: **OFF.** ► Posição VFD-BAGP-02: 0 Hz	x		
	► DO: Cmd Fecha VBM-TR-01 Status: **OFF.** ► Posição VBM-TR-01: 0%		x	TR-01 e TR-02 Continuaram em funcionamento
	► DO: Cmd ReqStrt BAGP-01 Status: **ON.** ► Posição VFD-BAGP-01: 55 Hz	x		
	► DO: Cmd ReqStrt BAC-02 Status: **ON.** ► Posição VFD-BAC-02: 52 Hz		x	Já estava ligada
	► DO: Cmd Abre VBM-UR-01 Status: **ON.** ► Posição VBM-UR-01: 100%	x		
	► DO: Cmd Abre VBM-TR-02 Status: **ON.** ► Posição VBM-TR-02: 100%		x	Já estava aberta
	► DO: Cmd ReqStrt - UR-01 ► PC-UR-01: DI: Cmd ReqStrt	x		Após 30s
	► UR-01 entra em funcionamen - to. Status: **ON**	x		
	Medições em Campo		**Observações**	
	► UR-01 modula Cap: 100%.			
	► $T_{Ag.Gel-Ent-UR-03}$ = 13,0°C ► $T_{Ag.Gel-Sai-UR-03}$ = 7,7°C			
	► $V_{Ag.Gel-UR-03}$ = 503 m^3/h			
	► $T_{Ag.Resf-Ent-UR-03}$ = 25,7°C ► $T_{Ag. Resf-Sai-UR-03}$ = 31,3°C			
	► $V_{Ag.Resf-UR-03}$ = 505 m^3/h			
	► Posição VFD-BAGP-03: 55 Hz			
	► Posição VFD-BAC-02: 47 Hz			
	Após Teste 18 realizar *reset* de todos os alarmes e falhas			

Fonte: Elaboração do autor.

Após análise da lógica de controle, verificou-se que, em caso de falha de *Chiller*, foi incluído um temporizador (pela empresa integradora do sistema de automação, na ocasião da programação da lógica) antes da parada da BAC do 1º UR (que, diferente das BAGPs, não são dedicadas aos *Chillers*). Na mesma condição, também foram incluídos temporizadores antes da parada dos VTRs e do fechamento das VBM-TRs.

Apesar dos desvios, os resultados dos testes indicaram que as mensagens de alarme e falha nas telas do sistema de supervisão e o acionamento do próximo *Chiller* na sequência de partida estavam funcionais, porém em desacordo com os requisitos da lógica de controle de projeto.

Na ocasião dos testes, o representante do cliente julgou que a rotina verificada em campo seria mais apropriada e validou o teste. Após isso, foi requerida a alteração do descritivo da lógica de controle de projeto, para ficar de acordo com a lógica de controle implementada em campo.

3.9.8 FALHAS NOS EQUIPAMENTOS – TORRES DE RESFRIAMENTO

O objetivo dos testes de falhas nos ventiladores das torres de resfriamento foi verificar as mensagens de alarme e falha nas telas do sistema de supervisão e nos painéis locais dos equipamentos. Além disso, foi verificado o acionamento da próxima torre na sequência de partida.

Quadro 22 – Teste 19

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
Teste 19. **Falha em Torre de Resfriamento** **2 TRs em funcionamento** ► Set SEQ: URs: 01/02 BAGPs: 01/02/03 BACs: 02/03/01 TRs: 01/02/03 ► UR-01 Ligado ► UR-02 Ligado ► BAGP-01 Ligada ► BAGP-02 Ligada ► BAC-02 Ligada ► BAC-03 Ligada ► TR-01 Ligada ► TR-02 Ligada ► VTR-01 Ligado ► VTR-02 Ligado ► VTR-03 Ligado ► VTR-04 Ligado ► **Set Falha VTR-01**	► Falha – VTR-01 ► Msg – Falha VTR-01 ► VTR-01 – Status: **OFF - Falha**	x		
	► DO: Cmd ReqStop VTR-02 ► Status: **OFF.** ► Posição VFD-VTR-02: 0 Hz	x		
	► DO: Cmd Abre VBM-TR-03 ► Status: **ON.** ► Posição VBM-TR-03: 100%	x		
	► DO: Cmd Fecha VBM-TR-01 ► Após 25 s ► VBM-TR-01 **OFF**	x		
	► DO: Cmd ReqStrt VTR-05 ► Status: **ON.** ► Posição VFD-VTR-05: 60 Hz	x		
	► DO: Cmd ReqStrt VTR-06 ► Status: **ON.** ► Posição VFD-VTR-06: 60 Hz	x		
	Outros Resultados		**Observações**	
	► UR-01 modula Cap: 94%.			
	► UR-03 modula Cap: 89%			
	► $T_{Ag.Resf-Ent-Torres}$ = 32,3°C ► $T_{Ag.Resf-Sai-Torres}$ = 25,7°C			
	► Msg Falha Tela do BMS?		Sim	
	Após Teste 19 realizar *reset* de todos os alarmes e falhas			

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 23 – Teste 20

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
Teste 20. **Falha em Torre de Resfriamento** **3 TRs em funcionamento** ► Set SEQ: URs: 01/02 BAGPs: 01/02/03 BACs: 02/03/01 TRs: 01/02/03 ► UR-01 Ligado ► UR-02 Ligado ► BAGP-01 Ligada ► BAGP-02 Ligada ► BAC-02 Ligada ► BAC-03 Ligada ► TR-01 Ligada ► TR-02 Ligada ► TR-03 Ligada ► VTR-01 Ligado ► VTR-02 Ligado ► VTR-03 Ligado ► VTR-04 Ligado ► VTR-05 Ligado ► VTR-06 Ligado ► **Set Falha VTR-01**	► Falha – VTR-01 ► Msg – Falha VTR-01 ► VTR-01 – Status: **OFF - Falha**	**x**		
	► DO: Cmd ReqStop VTR-02 ► Status: **OFF.** ► Posição VFD-VTR-02: 0 Hz	**x**		
	Outros Resultados		**Observações**	
	► UR-01 modula Cap: 100%.			
	► UR-03 modula Cap: 100%.			
	► $T_{Ag.Resf\text{-}Ent\text{-}Torres}$ = 33,5°C ► $T_{Ag.Resf\text{-}Sai\text{-}Torres}$ = 26,1°C			
	► Msg Falha Tela do BMS?		Sim	
	Após Teste 20 realizar *reset* de todos os alarmes e falhas			

Fonte: Elaboração do autor.

Os resultados dos testes indicaram que as mensagens de alarme e falha nas telas do sistema de supervisão, e o acionamento da próxima torre de resfriamento na sequência de partida estavam de acordo com os requisitos da lógica de controle do sistema.

3.9.9 FALHAS NOS COMPONENTES – NÍVEL DOS TANQUES DE EXPANSÃO

O objetivo dos testes de falhas de nível nos tanques de expansão do circuito de água gelada e do circuito de água de resfriamento foi verificar as mensagens de alarme e falha nas telas do sistema de supervisão, as paradas dos equipamentos de cada circuito e a retomada em operação.

Quadro 24 – Teste 21

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
Teste 21. **Nível Baixo no Tanque de Expansão do Circuito de Água Gelada** ► UR-01 Ligado ► BAGP-01 Ligada ► BAGS-02 Ligada ► BAC-02 Ligada ► TR-01 Ligada ► TR-03 Ligada ► VTR-01 Ligado ► VTR-02 Ligado ► VTR-05 Ligado ► VTR-06 Ligado ► **Set Nível Baixo** no Tanque de Expansão – LSL-01 (Chave de Nível Baixo)	► Msg Alarme na tela do BMS ► Nível Baixo – Tq Exp de Água Gelada	x		
	Outros Resultados	**Sim**	**Não**	**Observações**
	► CAG continua em funcionamento?	x		

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 25 – Teste 22

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
Teste 22. **Nível Crítico no Tanque de Expansão do Circuito de Água Gelada** ► UR-01 Ligado ► UR-02 Ligado ► BAGP-01 Ligada ► BAGS-02 Ligada ► BAGS-03 Ligada ► BAC-02 Ligada ► BAC-03 Ligada ► TR-01 Ligada ► TR-03 Ligada ► VTR-01 Ligado ► VTR-02 Ligado ► VTR-05 Ligado ► VTR-06 Ligado	► Msg Alarme na tela do BMS ► Nível Baixo – Tq Exp de Água Gelada	x		
	► DO: Cmd-ReqStop - UR-01 ► PC-UR-01: DI: Cmd-ReqStop	x		
	► DO: Cmd ReqStop - UR-02 ► PC-UR-02: DI: Cmd ReqStop	x		
	► Após 60 s - UR-01 e UR-02 – **OFF**	x		
	► DO: Cmd ReqStop BAGP-01 Status: **OFF.** ► Posição VFD-BAGP-01: 0 Hz	x		
	► DO: Cmd ReqStop BAGP-02 Status: **OFF.** ► Posição VFD-BAGP-02: 0 Hz	x		
	► DO: Cmd ReqStop BAGS-02 Status: **OFF** ► Posição VFD-BAGS-02: 0 Hz	x		

(continua)

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
► **Set Nível Baixo** no Tanque de Expansão – LSL-01 (Chave de Nível Baixo)	► DO: Cmd ReqStop BAGS-03 Status: **OFF** ► Posição VFD-BAGS-03: 0 Hz	x		
	Outros Resultados	**Sim**	**Não**	**Observações**
	► Todas as Bombas de água gelada estão desligadas?	x		

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 26 – Teste 23

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
Teste 23. **Nível Normal no Tanque de Expansão do Circuito de Água Gelada – Retomada de Operação** ► Todos os equipamentos da CAG parados ► **Set Nível Normal** no Tanque de Expansão	► Tq Exp de Água Gelada Status: Nível Normal ► Sem Msg	x		
	► DO: Cmd ReqStrt BAGS-03 Status: **ON.** ► Posição VFD-BAGS-01: 57 Hz	x		
	► DO: Cmd ReqStrt BAGP-01 Status: **ON.** ► Posição VFD-BAGP-01: 53 Hz	x		
	► DO: Cmd ReqStrt BAC-02 Status: **ON.** ► Posição VFD-BAC-02: 47 Hz	x		
	► DO: Cmd Abre VBM-UR-01 Status: **ON.** ► Posição VBM-UR-01: 100%	x		
	► DO: Cmd Abre VBM-TR-02 Status: **ON.** ► Posição VBM-TR-02: 100%	x		
	► DO: Cmd ReqStrt - UR-01 ► PC-UR-01: DI: Cmd ReqStrt	x		
	► UR-01 entra em funcionamento. Status: **ON**	x		

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 27 – Teste 24

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
Teste 24. **Nível Baixo no Tanque de Equalização das Torres Circuito de Água de Resfriamento** ► UR-01 Ligado ► BAGP-01 Ligada ► BAGS-02 Ligada ► BAC-02 Ligada ► TR-01 Ligada ► TR-03 Ligada ► VTR-01 Ligado ► VTR-02 Ligado ► VTR-05 Ligado ► VTR-06 Ligado ► **Set Nível Baixo** no ► Tanque de Equalização das Torres LSL-02 (Chave de Nível Baixo)	► Msg Alarme na tela do BMS ► Nível Baixo – Tq Equali - zação das torres de resfri - amento	x		
	Outros Resultados	**Sim**	**Não**	**Observações**
	► CAG continua em Funcionamento?	x		

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 28 – Teste 25

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
Teste 25. **Nível Crítico no Tanque de Equalização das Torres – Circuito de Água de Resfriamento** ► UR-01 Ligado ► BAGP-01 Ligada ► BAGS-02 Ligada ► BAC-02 Ligada ► TR-01 Ligada ► TR-03 Ligada ► VTR-01 Ligado ► VTR-02 Ligado ► VTR-05 Ligado ► VTR-06 Ligado **Set Nível Crítico** no Tanque de Equalização das Torres – LSLL-02 (Chave de Nível Crítico)	► Msg Falha na Tela do BMS ► Nível Crítico – Tq Equalização das torres de resfriamento	x		
	► BMS: DO: Cmd-ReqStop - UR-01 ► PC-UR-01: DI: Cmd-ReqStop	x		
	► Após 60 s - UR-01– **OFF**	x		
	► DO: Cmd Fecha VBM-UR-01 ► Após 30 s VBM-UR-01 **OFF**	x		
	► DO: Cmd ReqStop BAC-02 ► Status: **OFF.** ► Posição VFD-BAC-02: 0 Hz	x		
	► DO: Cmd ReqStop VTR-01 ► Status: **OFF.** ► Posição VFD-VTR-01: 0 Hz	x		
	► DO: Cmd ReqStop VTR-02 ► Status: **OFF.** ► Posição VFD-VTR-02: 0 Hz	x		

(continua)

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
	► DO: Cmd Fecha VBM-TR-01 ► Após 30s VBM-TR-01 **Fechada**	x		
	► DO: Cmd ReqStop VTR-05 ► Status: **OFF.** ► Posição VFD-VTR-05: 0 Hz	x		
	► DO: Cmd ReqStop VTR-06 ► Status: **OFF.** ► Posição VFD-VTR-06: 0 Hz	x		
	► DO: Cmd Fecha VBM-TR-03 ► Após 30s VBM-TR-03 **Fechada**	x		
	Outros Resultados	**Sim**	**Não**	**Observações**
	► Todas as Bombas de água de resfriamento estão desligadas?	x		
	► BAGPs ON?	x		BAGP-01 ON
	► BAGSs ON?	x		BAGS-02 ON

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 29 – Teste 26

Ajustes/Condições	Resultados Esperados	Sim	Não	Resultado Efetivo
Teste 26. **Nível Normal no Tanque de Equalização das Torres – Circuito de Água de Resfriamento – Retomada de Operação** ► Todos os equipamentos do Circuito de Água de Resfriamento parados ► BAGP-01 Ligada ► BAGS-02 Ligada ► **Set Nível Normal** no Tanque de Equalização das Torres	► Tq Equalização das Torres Status: Nível Normal ► Sem Msg	x		
	► DO: Cmd ReqStrt BAC-02 ► Status: **ON.** ► Posição VFD-BAC-02: 49 Hz	x		
	► DO: Cmd Abre VBM-UR-01 ► Status: **ON.** ► Posição VBM-UR-01: 100%	x		
	► DO: Cmd Abre VBM-TR-01 ► Status: **ON.** ► Posição VBM-TR-01: 100%	x		
	► DO: Cmd ReqStrt - UR-01 ► PC-UR-01: DI: Cmd ReqStrt	x		
	► UR-01 entra em funcionamento. Status: **ON**	x		

Fonte: Elaboração do autor.

Os resultados dos testes indicaram que as mensagens de alarme e falha nas telas do sistema de supervisão, e a parada dos equipamentos resultantes dos níveis críticos nos tanques estavam de acordo com os requisitos da lógica de controle do sistema. Após a parada, com a água nos tanques voltando aos níveis normais, a retomada de operação dos equipamentos nos tanques ocorreu de acordo com os requisitos da lógica de controle do sistema.



4 SISTEMAS DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

O sistema de controle e automação é um sistema que atua sobre os equipamentos e alguns dos dispositivos de regulagem do sistema de ar condicionado, de modo a atender os requisitos de projeto (conforto, qualidade do ar, eficiência, etc.) e garantir a operação segura e estável, dentro das faixas operacionais previamente estabelecidas. Os elementos de controle podem ser sensores de temperatura, vazão, umidade do ar, pressão, corrente de motor, sensores de posição de válvulas, status de equipamentos e até controles gerados por aplicativos de celulares, computadores ou *tablets* comandados pelos usuários dos ambientes condicionados.

Devido aos benefícios com a evolução da tecnologia de controle, os sistemas de ar condicionado se tornaram mais eficazes e eficientes, porém mais complexos, de modo tal que, para o seu funcionamento adequado, é fundamental que haja um sistema de controle e automação integrado.

Porém, a necessidade inicial de se integrar um sistema de automação ao sistema de ar condicionado está relacionada à própria característica de operação dinâmica diária e mesmo anual do sistema de ar condicionado, o qual é dimensionado para a condição de carga máxima, mas que opera a maioria do tempo em cargas parciais. Além disso, na operação em carga parcial, o comportamento dos vários equipamentos do sistema é muito diferenciado e não é possível garantir uma operação estável para atender os requisitos de projeto do sistema sem a utilização de lógicas de controle.

Portanto, a otimização operacional do sistema de ar condicionado só é possível por meio de um sistema de automação. No entanto, é extremamente importante conceber e configurar o sistema de automação de maneira adequada para que haja resultados efetivos.

Sistemas de controle e monitoramento aplicados de maneira inadequada, com lógicas incompletas, sem instrumentação de campo apropriada ou com sensores mal posicionados, além de equipes de operação sem qualificação, são as principais causas do baixo desempenho de um sistema de ar condicionado de alta eficiência.

O segredo para a operação eficiente de um sistema de água gelada (independente da eficiência de projeto dos equipamentos) é o desenvolvimento adequado de uma lógica orientada à eficiência energética, com os elementos de controle necessários e adequados e com o sistema funcionalmente comissionado e testado.

4.1 DESENVOLVIMENTO DAS LÓGICAS DE CONTROLE E SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO PARA O SISTEMA DE AR CONDICIONADO

É responsabilidade da equipe de engenharia do projeto de automação e do integrador o desenvolvimento de todo projeto do sistema de automação envolvendo a arquitetura do sistema, rede de controladores, comunicação de dados, interoperabilidade com os demais sistemas computadorizados e controladores locais de equipamentos, cabeamento de sensores e rede de comunicação, instrumentos a serem aplicados, além da infraestrutura para a montagem do sistema.

Porém, quem deve definir como a automação controlará o sistema de ar condicionado é a equipe de engenharia de projeto do sistema de ar condicionado, incluindo as lógicas de controle, fluxograma de engenharia (P&I), sequências de operação, condições de falhas, definição da instrumentação adequada, definição dos dados a serem monitorados e pontos de controle e monitoração (pontos de entrada/saída digitais e analógicos e dados a serem monitorados dos equipamentos através de redes de comunicação), características das telas do sistema supervisório, em resumo, tudo o que se diz respeito ao sistema ar condicionado, deve ser função da equipe de engenharia do projeto de ar condicionado e não do projeto de automação.

Como qualquer outro sistema predial, o sistema de automação deve ser integrado aos demais sistemas prediais. E o sistema de ar condicionado é talvez o que mais exige e depende dessa integração.

4.2 OPERADORES DO CONTROLADOR DO SISTEMA DE AR CONDICIONADO

Muitas vezes o operador do sistema de controle do ar condicionado é um técnico de automação, que pode ser um *expert* em automação (normalmente com formação técnica em eletrônica e/ou *software*), mas sem uma formação com o conhecimento requerido sobre sistemas ar condicionado.

O técnico de automação deve ser o responsável pela operação e manutenção do sistema de automação e todos os seus elementos (controladores, cabeamento, comunicação de dados), uma atividade muito importante e requer profissionais capacitados, tais como um técnico em eletrônica e eventualmente um técnico de *software*.

No entanto, o controle do sistema de ar condicionado, cujo possui uma "ferramenta de controle" chamada sistema de automação, deve ser realizado por técnicos qualificados do sistema de ar condicionado, que conheçam os fundamentos de ar condicionado, refrigeração e hidráulica e que sejam treinados a partir do descritivo lógico do sistema e das sequências de operação. Isso é essencial para o funcionamento adequado do sistema de ar condicionado.

Recomenda-se que o supervisor da equipe de operação e manutenção seja um engenheiro mecânico, com especialização em ar condicionado, pois esse é o sistema predial mais complexo de um edifício. Esse profissional deveria ser o controlador do sistema de automação (não o operador, que deveria ser um técnico de ar condicionado). Em edifícios mais inteligentes, com os demais sistemas prediais igualmente complexos (controle otimizado da iluminação, consumo de água, controle de acesso, etc.), devem ser utilizadas estações de trabalho distintas, com operadores e controladores igualmente qualificados, em função da complexidade dos sistemas.

4.3 QUALIDADE DO INTERIOR (QAI) E CONFORTO TÉRMICO

No sistema de ar condicionado, é o sistema de automação que realiza o controle de renovação de ar externo de maneira adequada. De outra forma, com a vazão de renovação de ar externo constante, é possível manter a QAI, porém em dias quentes, quando a entalpia do ar externo (que varia em função da temperatura do ar e umidade relativa) estiver mais alta que a entalpia do ar ambiente, se a taxa de ocupação for menor, haverá um suprimento excessivo de ar externo, exigindo maior capacidade (desnecessária) dos condicionadores de ar.

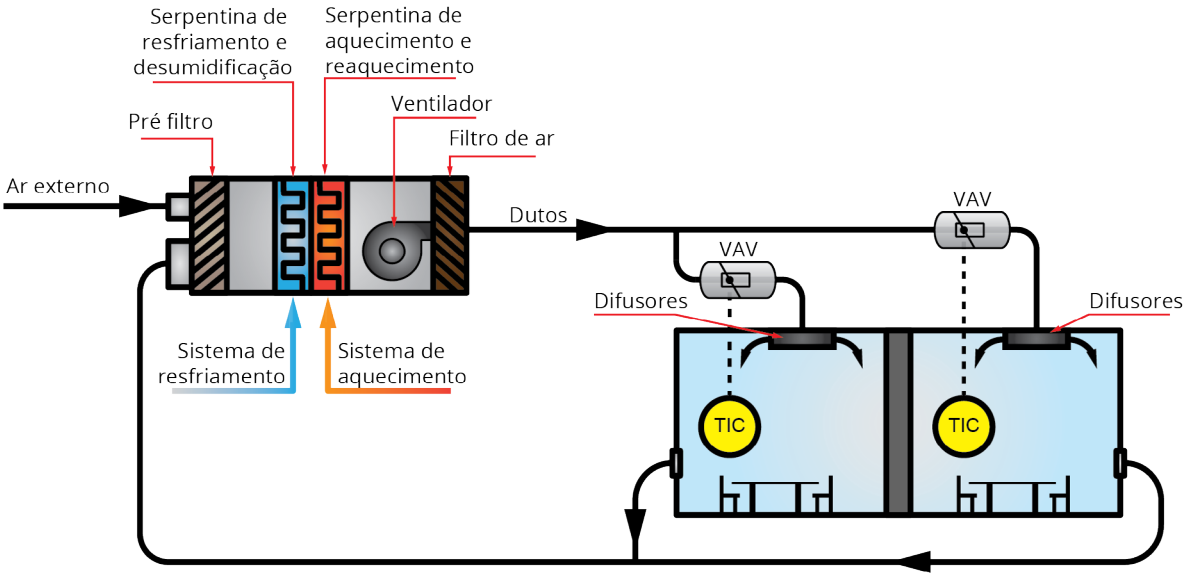
Existem muitas oportunidades de otimização do controle da taxa de ar externo, incluindo a aplicação de ciclos economizadores nos períodos mais secos e com temperaturas mais amenas, o que permite uma grande redução do consumo de energia do sistema de ar condicionado. No entanto, é crucial a aplicação de um controle adequado, e com um programa de manutenção rigoroso, incluso no PMOC, Plano de Manutenção, Operação e Controle do Sistema de Ar Condicionado.

O conforto térmico precisa ser controlado em modo automático e não pelo operador (modo manual remoto) em função das reclamações dos usuários (mais frio, mais quente, menos "vento", etc). Esse controle nem sempre é propriamente configurado e ajustado, porque na ocasião do TAB e dos testes funcionais do sistema de ar condicionado operando sob o controle da automação, o edifício ainda não está ocupado (ou opera com ocupação mínima). Portanto, é muito importante uma segunda etapa de ajuste e configuração dos controles após a ocupação dos pavimentos para melhor atender o conforto dos usuários. Isso é bem diferente do que ajustar os *setpoints* a partir das reclamações.

É importante destacar que a controlabilidade do sistema para atender o conforto térmico depende da concepção do sistema de ar condicionado.

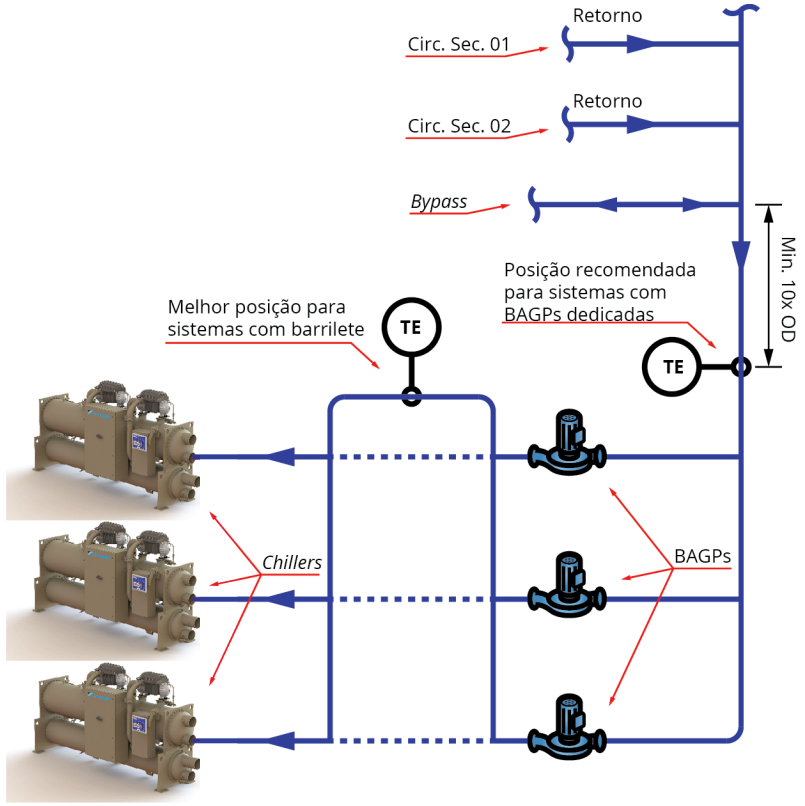
Em um projeto é possível escolher um sistema mais eficiente ou menos eficiente, e nesse caso, a função do sistema de automação será de manter os níveis de eficiência energética de projeto, para as várias condições de operação do sistema ao longo do ano. No caso do conforto térmico, se a concepção do ar condicionado for limitada (por redução de investimento ou concepção errônea – incluindo da automação ou falta de engenharia), o sistema de automação não garantirá o conforto

Figura 25 – Esquema típico dos equipamentos e elementos necessários para controle do sistema de ar condicionado nos ambientes



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 26 – Posições recomendadas para instalação do sensor de temperatura de água gelada na tubulação geral de entrada dos *Chillers*



Fonte: Elaboração do autor com fotos dos equipamentos de cortesia da Daikin do Brasil Ltda.

térmico. Algumas soluções de baixo investimento, tais como controle de temperatura pelo retorno (em sistema com multizonas), zoneamento inadequado, sistema de distribuição de ar mal dimensionado, falta de controle de umidade relativa, sistemas sem taxa renovação de ar externo (renovação pelas frestas), são em muitos casos as causas do desconforto térmico nos ambientes. Não há sistema de automação que possa corrigir esses tipos de problemas. A Figura 25 mostra um esquema típico dos elementos mínimos necessários para um bom controle do sistema de ar condicionado visando garantir as condições ambientes e o conforto térmico dos usuários.

4.4 SISTEMA DE ÁGUA GELADA – INSTRUMENTAÇÃO MÍNIMA NECESSÁRIA

Um dos requisitos para se garantir os índices de eficiência energética de um sistema de água gelada é a instalação de instrumentos apropriados nos pontos corretos. A seguir, os principais pontos de medição que devem constar em um sistema de água gelada (além dos sensores típicos dos equipamentos) e as melhores posições para sua instalação.

4.4.1 TEMPERATURA DE ENTRADA DE ÁGUA GELADA NOS *CHILLERS*

Conforme indicado na Figura 26, o sensor deve ser instalado no barrilete de sucção das BAGPs (em sistemas com circuito primário e secundário de água gelada), antes da tubulação de sucção da primeira BAGP OU no barrilete de alimentação dos *Chillers* (quando aplicável) antes da tubulação de alimentação do primeiro *Chiller*. Recomendações:

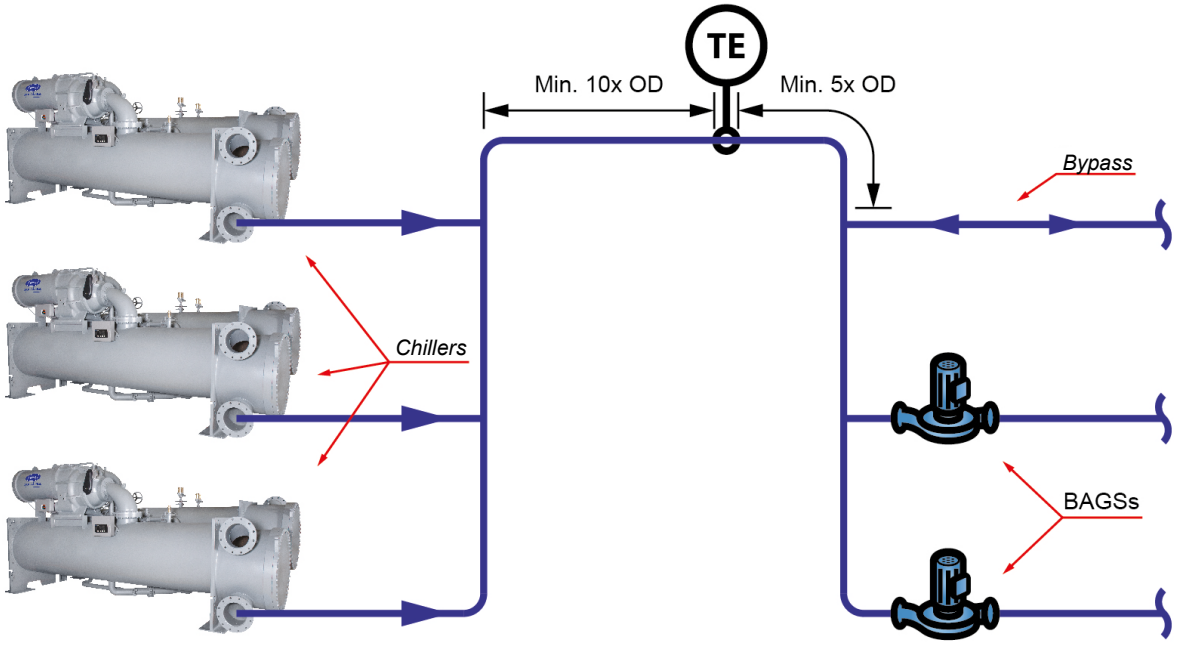
- É essencial instalar o sensor (precisa haver um trecho mínimo para isso) após as conexões de todas as linhas de retorno dos circuitos secundários e após a conexão com a tubulação do *bypass* de água gelada;
- É melhor instalar apenas um sensor na tubulação principal de alimentação para os *Chillers* do que um para cada *Chiller*, pois poderá haver diferenças de leitura por desvios típicos ou erro do sensor;
- Os sensores integrados aos painéis dos *Chillers* também devem ser utilizados, mas apenas como referência. Esses dados devem ser enviados ao sistema de automação por meio de um módulo de comunicação de dados com protocolo padrão (normalmente BACnet ou Modbus);
- Assim, para o cálculo da capacidade de cada *Chiller*, recomenda-se utilizar este sensor (comum) para todos os *Chillers*.

4.4.2 TEMPERATURA DE SAÍDA DE ÁGUA GELADA NOS *CHILLERS*

O sensor deve ser instalado no barrilete de saída dos *Chillers*, conforme indicado na Figura 27. Recomendações:

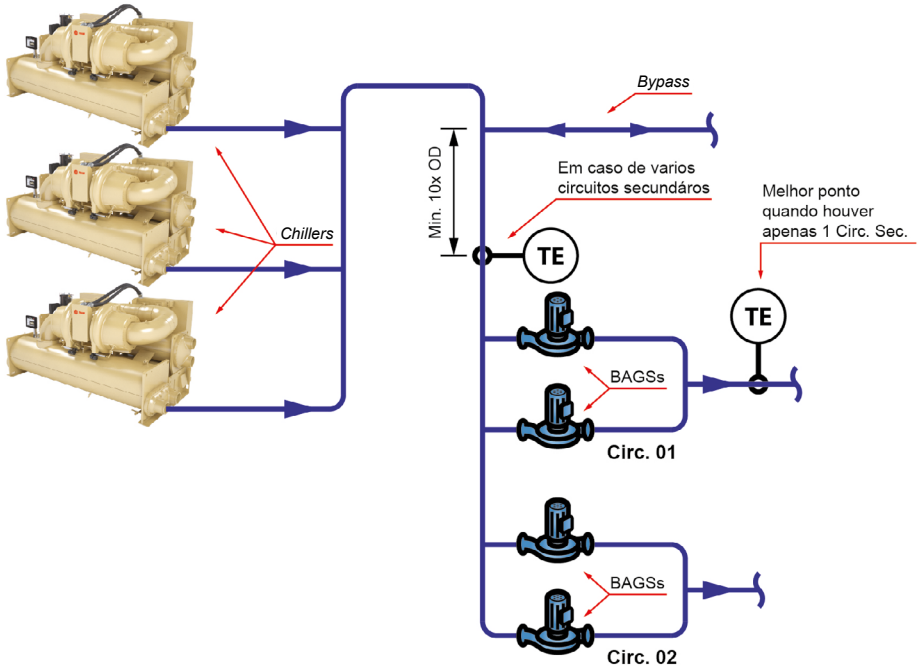
- É essencial instalar o sensor (precisa haver um trecho mínimo para isso) após a tubulação de saída do último *Chiller* em direção a alimentação das BAGSs (ou BAGMs), e antes da conexão com a tubulação do *bypass* de água gelada;
- É necessário instalar este sensor na tubulação principal de saída dos *Chillers* para verificar diferenças de temperaturas em relação aos sensores de saída de cada *Chiller*, a fim de detectar eventuais fluxos de água de retorno (“quente”) por *Chillers* que estão parados, devido a uma eventual falha de fechamento total de válvula de bloqueio motorizada ou por fluxo secundário excessivo (em sistemas com circuito primário e secundário) que provoca fluxo de água pelas BAGPs paradas;
- Em sistemas com circuito primário e secundário, este sensor não deve ser utilizado como elemento de controle da sequência de entrada em operação dos *Chillers*, pois ele estará instalado antes da conexão do *bypass* que poderá ter fluxo de retorno do circuito secundário, em caso de vazão excessiva no circuito secundário (síndrome de baixo ΔT);
- Para o cálculo de capacidade de cada *Chiller* deve ser utilizado o sensor de temperatura de saída de água gelada do *Chiller*, normalmente integrado ao seu painel de controle (local) e que deve ser integrado ao sistema de automação por meio de módulo de comunicação de dados com protocolo padrão (normalmente BACnet ou Modbus).

Figura 27 – Posição recomendada para instalação do sensor de temperatura de água gelada na tubulação geral de saída dos *Chillers*



Fonte: Elaboração do autor com fotos dos equipamentos de cortesia de Midea Carrier do Brasil Ltda.

Figura 28 – Posições recomendadas para instalação do sensor de temperatura de água gelada na tubulação geral de alimentação para os equipamentos usuários



Fonte: Elaboração do autor com fotos dos equipamentosde cortesia de Trane - Ingersoll Rand do Brasil Ltda.

4.4.3 TEMPERATURA DE ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA GELADA PARA OS EQUIPAMENTOS USUÁRIOS (CONDICIONADORES DE AR)

A Figura 28 mostra as posições de instalação do sensor, que deve ser instalado no barrilete de sucção das BAGSs (em sistemas com circuito primário e secundário) ou das BAGMs (circuito único com vazão variável de água gelada). Quando houver apenas um conjunto de BAGSs ou BAGMs, é melhor instalar no barrilete de recalque das bombas. Recomendações:

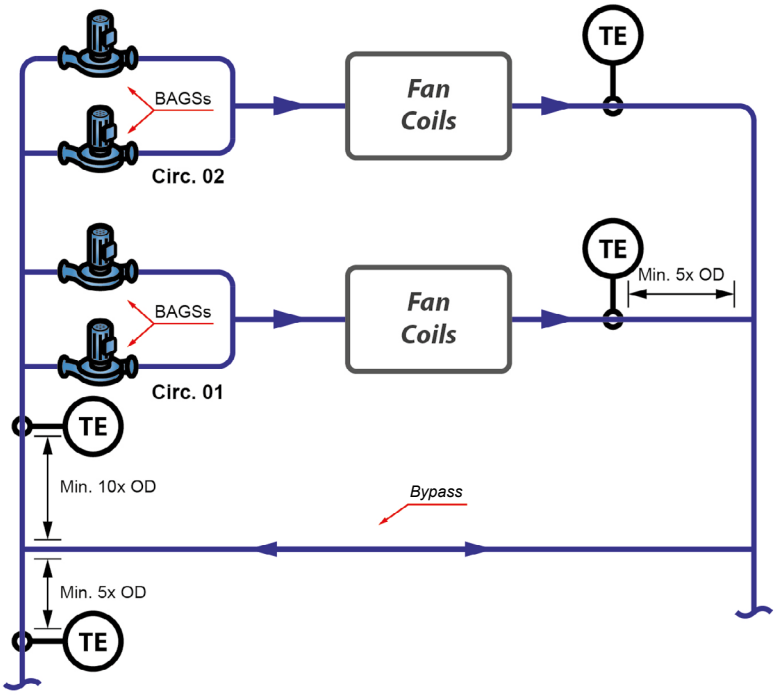
- É essencial instalar o sensor (precisa haver um trecho mínimo para isso) após a conexão com a tubulação do *bypass* de água gelada;
- Este é o sensor a ser utilizado como elemento de controle da sequência de entrada em operação dos *Chillers*;
- Quando houver vários circuitos secundários ou vários circuitos principais de distribuição de água gelada para os equipamentos usuários (ex. única CAG que atende vários edifícios de um complexo empresarial) deve ser utilizado este sensor para o cálculo de capacidade de cada circuito secundário ou principal.

4.4.4 TEMPERATURA DE ÁGUA GELADA NA TUBULAÇÃO PRINCIPAL DE RETORNO DOS EQUIPAMENTOS USUÁRIOS (CONDICIONADORES DE AR)

Como indicado na Figura 29, o sensor deve ser instalado no barrilete principal de retorno (após a conexão de retorno do último equipamento usuário) de cada circuito secundário ou de cada circuito principal. Recomendações:

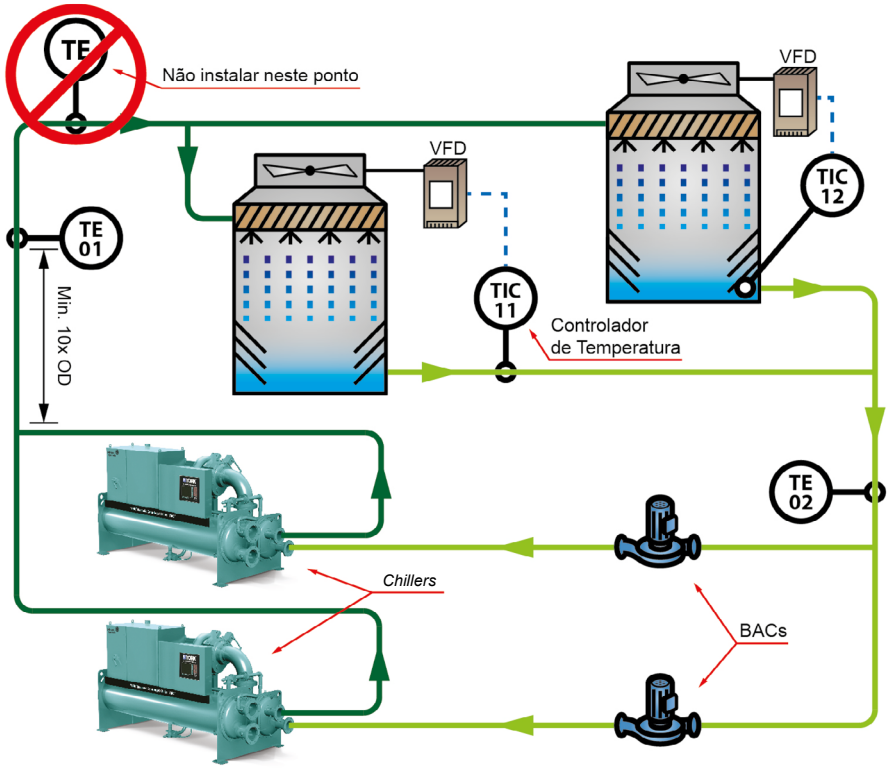
- Em caso de apenas um conjunto de BAGSs ou BAGMs, é essencial instalar o sensor (precisa haver um trecho mínimo para isso) antes da conexão da tubulação do *bypass* de água gelada;
- Este é o sensor a ser utilizado para o cálculo de capacidade de cada circuito secundário ou principal.

Figura 29 – Posições recomendadas para instalação dos sensores de temperatura de água gelada na tubulação geral de alimentação para os equipamentos usuários



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 30 – Posição recomendada para instalação dos sensores de temperatura de água de resfriamento na tubulação geral de alimentação para as torres e posição dos sensores de temperatura de saída de água das torres de resfriamento



Fonte: Elaboração do autor com fotos dos equipamentos de cortesia de Johnson Controls BE Ltda.

4.4.5 TEMPERATURA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO NA TUBULAÇÃO PRINCIPAL DE ALIMENTAÇÃO PARA AS TORRES DE RESFRIAMENTO

A Figura 30 mostra a melhor posição de instalação do sensor de temperatura de água de retorno para as torres de resfriamento (TE-01), que deve ser instalado no barrilete principal de alimentação para as torres de resfriamento (após a conexão de retorno do último *Chiller*). Recomendações:

- Evitar instalar este sensor no trecho da tubulação mais elevado do sistema, muito próximo à entrada das torres de resfriamento, pois pode haver presença de ar neste trecho;
- Este é o sensor a ser utilizado para o cálculo de capacidade das torres de resfriamento, em conjunto com o sensor de saída de água de cada torre.

4.4.6 TEMPERATURA DE SAÍDA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO DE CADA TORRE DE RESFRIAMENTO

Conforme indicado na Figura 30, o sensor temperatura de saída de água de cada torre de resfriamento pode ser instalado na tubulação de saída da torre (TIC-11) ou na bacia da torre (TIC-12), mas junto da conexão de saída.

Recomendação:

- Este sensor é essencial para o sistema, juntamente com o sensor de temperatura de bulbo úmido do ar externo, pois com eles é possível monitorar o *approach* na saída de cada torre. O *approach* na saída da torre de resfriamento é o principal elemento de monitoração do desempenho deste equipamento, principalmente para análise do aumento da sujidade no enchimento. Para uma melhor análise ver o item 5.2.2;

- O sensor na saída de cada torre pode ser utilizado ainda para controle individual da frequência do inversor do ventilador da torre;
- Evitar instalar o sensor no trecho horizontal da tubulação de saída da torre de resfriamento, pois pode haver presença de ar neste trecho.

4.4.7 TEMPERATURA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO NA TUBULAÇÃO PRINCIPAL DE ALIMENTAÇÃO PARA OS *CHILLERS*

A Figura 30 mostra também a posição do sensor a ser instalado no barrilete principal de alimentação de água de resfriamento para os *Chillers* (TE-02). Recomendações:

- Em sistemas com BACs dedicadas aos *Chillers*, deve ser instalado no barrilete de sucção das BACs, antes da conexão com a tubulação de sucção da 1ª BAC, vindo do fluxo das torres;
- Em sistemas com BACs com recalque para um barrilete de distribuição geral, é preferível instalar no barrilete de recalque após a conexão com a tubulação de recalque da última BAC no sentido do fluxo para os *Chillers* e antes da conexão de alimentação para o 1º *Chiller*;
- Evitar instalar este sensor no trecho horizontal do barrilete de saída das torres de resfriamento, pois pode haver presença de ar neste trecho.

4.4.8 TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO (T_{BU}) DO AR EXTERNO PRÓXIMO ÀS TORRES DE RESFRIAMENTO

É preferível instalar um sensor de T_{BU} apropriado a um conjunto sensor de T_{BS} e sensor de umidade relativa e a partir das leituras realizar um cálculo (que normalmente é um valor aproximado). Recomendações:

- Não deve ser instalado ao sol nem em áreas fechadas;
- Este sensor é essencial para o sistema, pois, juntamente com o sensor de temperatura de saída de água de resfriamento das torres, é possível monitorar o *approach* na saída de cada torre.

4.4.9 VAZÃO DE ÁGUA GELADA NOS *CHILLERS*

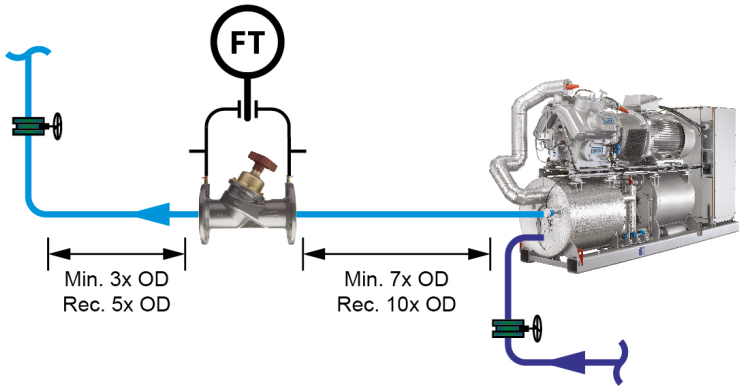
O sensor deve ser instalado na tubulação de entrada ou de saída de cada *Chiller*. Tanto faz, pois a vazão na entrada é exatamente igual à vazão de saída. Recomendações:

- Em sistemas com vazão constante nos *Chillers*, pode ser utilizado um transmissor de pressão diferencial acoplado à válvula de balanceamento de água gelada do *Chiller*, conforme mostra a Figura 31. Neste caso, o cálculo da vazão será obtido da relação da perda de pressão medida na válvula e o valor de kv da válvula (obtido a partir da quantidade de voltas e décimos de volta da posição de abertura da válvula, no *software* do fabricante);
- É importante observar que esses transmissores precisam de uma perda de pressão mínima na válvula para ter uma leitura confiável. Tipicamente, abaixo de 3,0 kPa de perda de pressão na válvula, o valor da leitura será 0,0 (zero). Portanto, na ocasião do TAB, deve-se buscar uma posição de abertura da válvula onde se garanta pelo menos 10,0 kPa. Apesar de se considerar uma "vazão constante" no *Chiller*, quando comparado aos sistemas com vazão variável, a vazão de água gelada pode ter variações de +30% a -30% em relação ao valor de projeto, dependendo da configuração da instalação e da quantidade de *Chillers* em operação. É recomendável durante o TAB fazer estas verificações para definição da posição de ajuste.
- Quando utilizar um transmissor de pressão diferencial acoplado à válvula de balanceamento de água gelada do *Chiller* para o cálculo da vazão, selecionar um medidor de pressão diferencial (e não dois sensores de pressão distintos). A faixa de medição para o este tipo de medidor deve ser cuidadosamente selecionada para garantir uma leitura confiável. Normalmente o valor de fundo de escala destes instrumentos deve ser menor que 50 kPa;
- A medição de vazão utilizando transmissor de pressão diferencial acoplado à válvula de balan-

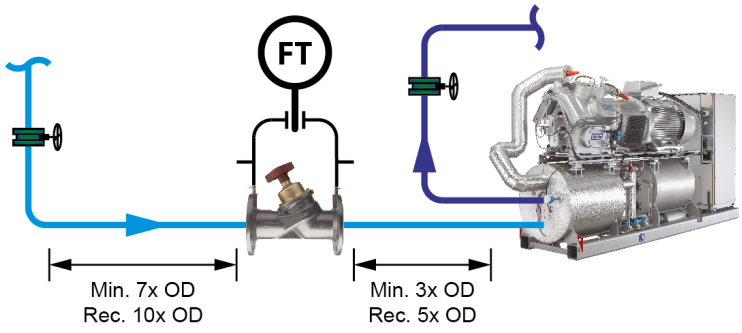
ceamento utiliza o kv obtido da posição de abertura da válvula. Portanto, não se deve alterar a posição de abertura da válvula. Em caso de novo balanceamento no circuito, se a posição da válvula for alterada, o valor do kv será alterado e o novo valor deverá ser alterado no BMS. Recomenda-se ainda disponibilizar na tela do BMS a posição de abertura da válvula e o kv atual.

Figura 31 – Posição recomendada para instalação dos sensores e medidores de vazão de água gelada dos *Chillers*, aplicados para vazão constante

Medidor de vazão (constante) instalado na tubulação de saída



Medidor de vazão (constante) instalado na tubulação de entrada



Fonte: Elaboração do autor com fotos dos equipamentos de cortesia de Johnson Controls BE Ltda.

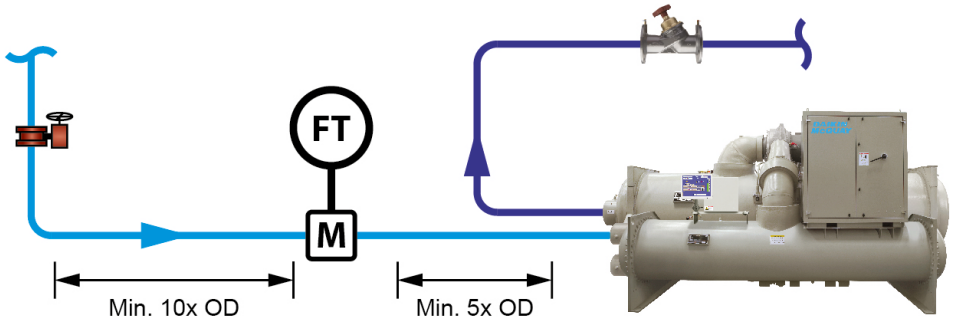
Nota:

Pode ser na tubulação de entrada ou saída.

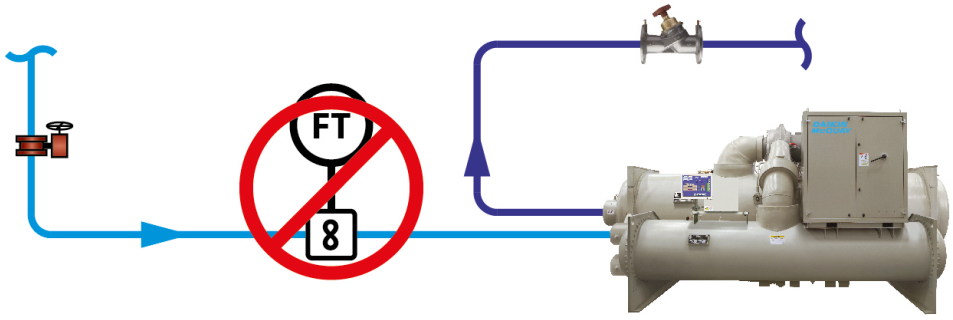
- Em sistemas com vazão de água gelada variável nos *Chillers*, principalmente quando houver requisitos de controle de vazão mínima, não é recomendável utilizar os transmissores de pressão diferencial como elemento primário. Neste caso, é altamente recomendável utilizar medidor de vazão magnético tubular ou medidor de vazão por ultrassom para tubulação maior que OD 16 in ou DN 400. Estes são medidores que permitem uma faixa com grande variação de vazão e alta precisão de leitura, como indicado na Figura 32;
- A Figura 32 também mostra que não é recomendável utilizar medidores de vazão do tipo rotor axial (popularmente chamado de medidor de "ventoinha") em sistemas com vazão de água gelada variável nos *Chillers*. Por melhor que seja a precisão do instrumento, ele não é apropriado para medição de vazão variável. Basta observar que para instalar o sensor na tubulação o manual do instrumento requer o diâmetro da tubulação e a vazão atual para o cálculo da inserção da haste do sensor no interior da tubulação. No cálculo, para um mesmo diâmetro, porém com vazões diferentes, a posição de inserção da haste deveria ser variável, o que não é possível realizar em campo. É muito comum verificar valores de vazão igual a zero quando a velocidade do fluxo é menor que 0,5 m/s ou 25% da velocidade de projeto;
- É essencial instalar o sensor de vazão ou a válvula de balanceamento em trecho reto, normalmente no mínimo de 7xOD a 10xOD à jusante e de 3xOD a 5xOD à montante da posição do sensor;
- Este é o sensor a ser utilizado para o cálculo da capacidade de cada *Chiller*. É muito importante calcular a capacidade atual dos *Chillers* e os respectivos COPs, pois os *Chillers* são responsáveis por 20% a 30% do consumo de energia total de um edifício.

Figura 32 – Posição recomendada para instalação dos sensores e medidores de vazão de água gelada dos *Chillers*, aplicados para vazão variável

Medidor de vazão (variável) magnético tubular



Não utilizar medidor de vazão (variável) de rotor axial (ventoinha)



Fonte: Elaboração do autor com fotos dos equipamentos de cortesia de Daikin do Brasil Ltda.

Nota:

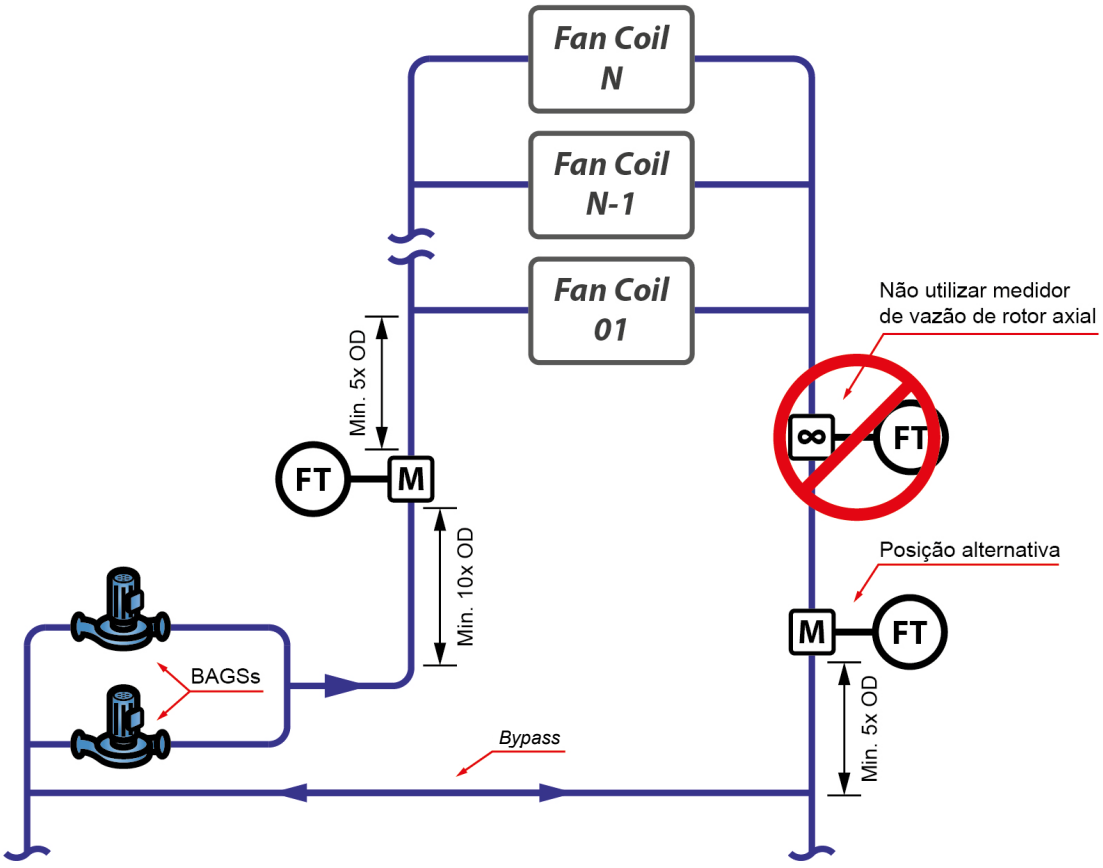
Pode ser na tubulação de entrada ou saída.

4.4.10 VAZÃO DE ÁGUA GELADA NOS CIRCUITOS SECUNDÁRIOS OU CIRCUITOS PRINCIPAIS

O sensor deve ser instalado na tubulação principal de alimentação de cada circuito, antes de qualquer derivação ou na tubulação principal de retorno de cada circuito, após a última derivação de retorno do circuito, qualquer uma, pois a vazão de alimentação é exatamente igual à vazão de retorno. Recomendações:

- É altamente recomendável utilizar medidor de vazão magnético tubular ou medidor de vazão por ultrassom (para tubulação maior que OD 16 in ou DN 400). Estes são medidores que permitem uma faixa com grande variação de vazão e alta precisão de leitura;
- Apesar de muito comum nas instalações no Brasil, em sistemas com vazão de água gelada variável nos *Chillers*, não é recomendável utilizar medidores de vazão do tipo rotor axial ("ventoinha"). Por melhor que seja a precisão do instrumento, ele não é apropriado para medição de fluxo com vazão variável;
- É essencial instalar o sensor de vazão em trecho reto, normalmente no mínimo de 7xOD a 10xOD à jusante e de 3xOD a 5xOD à montante da posição do sensor;
- Este é o sensor a ser utilizado para o cálculo da capacidade de cada circuito secundário ou principal e da capacidade atual total do sistema de água gelada.

Figura 33 – Posição recomendada para instalação dos sensores e medidores de vazão de água gelada nos circuitos principais ou circuitos secundários, com vazão variável



Fonte: Elaboração do autor.

4.4.11 VAZÃO DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO NOS *CHILLERS*

O sensor deve ser instalado na tubulação de entrada ou de saída de cada *Chiller*, qualquer uma, pois a vazão na entrada é exatamente igual à vazão na saída. Recomendações:

- Este medidor não é necessariamente essencial, porém, em sistemas com as BACs em recalque para um barrilete de distribuição de água de resfriamento a todos os *Chillers* (qualquer BAC opera com qualquer *Chiller*), é muito importante instalar este sensor (um em cada *Chiller*) para controlar os inversores de frequência das BACs de modo a garantir a vazão constante no condensador e evitar problemas de sobre corrente nos motores das BACs quando o sistema opera com a quantidade mínima de *Chillers* e BACs;
- O mesmo problema pode ocorrer em sistemas com longos trechos de tubulação de vazão total, por exemplo, quando a CAG está instalada no subsolo e as torres de resfriamento na cobertura do edifício (mesmo em circuito com bombas dedicadas aos *Chillers*). Quanto maior o comprimento equivalente dos trechos dimensionados para a vazão total em relação aos trechos dimensionados para a vazão de apenas um *Chiller* (uma BAC e uma torre de resfriamento), maior será o aumento de vazão nas BACs operantes, na medida em que o sistema opera com vazão total menor que a vazão total de projeto. No exemplo acima, com o sistema operando com apenas um *Chiller* e uma BAC, a vazão no circuito será maior que 33% da vazão total, podendo ser superior à 50%, quanto maior for o comprimento equivalente dos trechos dimensionados para a vazão total;

- Em sistemas com vazão de água de resfriamento constante nos *Chillers*, pode ser utilizado um transmissor de pressão diferencial acoplado à válvula de balanceamento de água de resfriamento do *Chiller*. Neste caso, o cálculo da vazão será obtido da relação da perda de pressão medida na válvula e o valor de kv da válvula (obtido a partir da quantidade de voltas e décimos de volta da posição de abertura da válvula, no *software* do fabricante);
- É importante observar que estes transmissores precisam de uma perda de pressão mínima na válvula para ter uma leitura confiável. Tipicamente, abaixo de 3.0 kPa de perda de pressão na válvula, o valor da leitura será 0,0 (zero). Portanto, na ocasião do TAB, deve-se buscar uma posição de abertura da válvula onde se garanta pelo menos 10,0 kPa;
- Quando utilizar transmissor de pressão diferencial acoplado à válvula de balanceamento de água de resfriamento do *Chiller* para o cálculo da vazão, selecionar um medidor de pressão diferencial (e não dois sensores de pressão distintos). A faixa de medição para o este tipo de medidor deve ser cuidadosamente selecionada para garantir uma leitura confiável. Normalmente, o valor de fundo de escala recomendado para estes instrumentos deve ser de 50 kPa;
- A medição de vazão utilizando transmissor de pressão diferencial acoplado à válvula de balanceamento utiliza o kv obtido da posição de abertura da válvula. Portanto, não se deve alterar a posição de abertura da válvula. Em caso de novo balanceamento no circuito, se a posição da válvula for alterada, o valor do kv será alterado e o novo valor deverá ser alterado no BMS. Recomenda-se ainda disponibilizar na tela do BMS a posição de abertura da válvula e o kv atual;
- Em sistemas com vazão de água de resfriamento variável nos *Chillers*, principalmente quando houver requisitos de controle de vazão mínima, não é recomendável utilizar os transmissores de pressão diferencial como elemento primário. Neste caso, é altamente recomendável utilizar medidor de vazão magnético tubular ou, para tubulação maior que OD 16 in ou DN 400, medidor de vazão por ultrassom, como indicado na Figura 32. Estes são medidores que permitem uma faixa com grande variação de vazão e alta precisão de leitura;
- Em sistemas com vazão de água de resfriamento variável nos *Chillers*, nunca se deve utilizar medidores de vazão do tipo rotor axial (popular "ventoinha"). Por melhor que seja a precisão do instrumento, ele não é apropriado para medição de fluxo com vazão variável;
- É essencial instalar o sensor de vazão ou a válvula de balanceamento em trecho reto, normalmente no mínimo de 7xOD a 10xOD à jusante e de 3xOD a 5xOD à montante da posição do sensor.

4.4.12 POTÊNCIA ATIVA NOS MOTORES DOS EQUIPAMENTOS

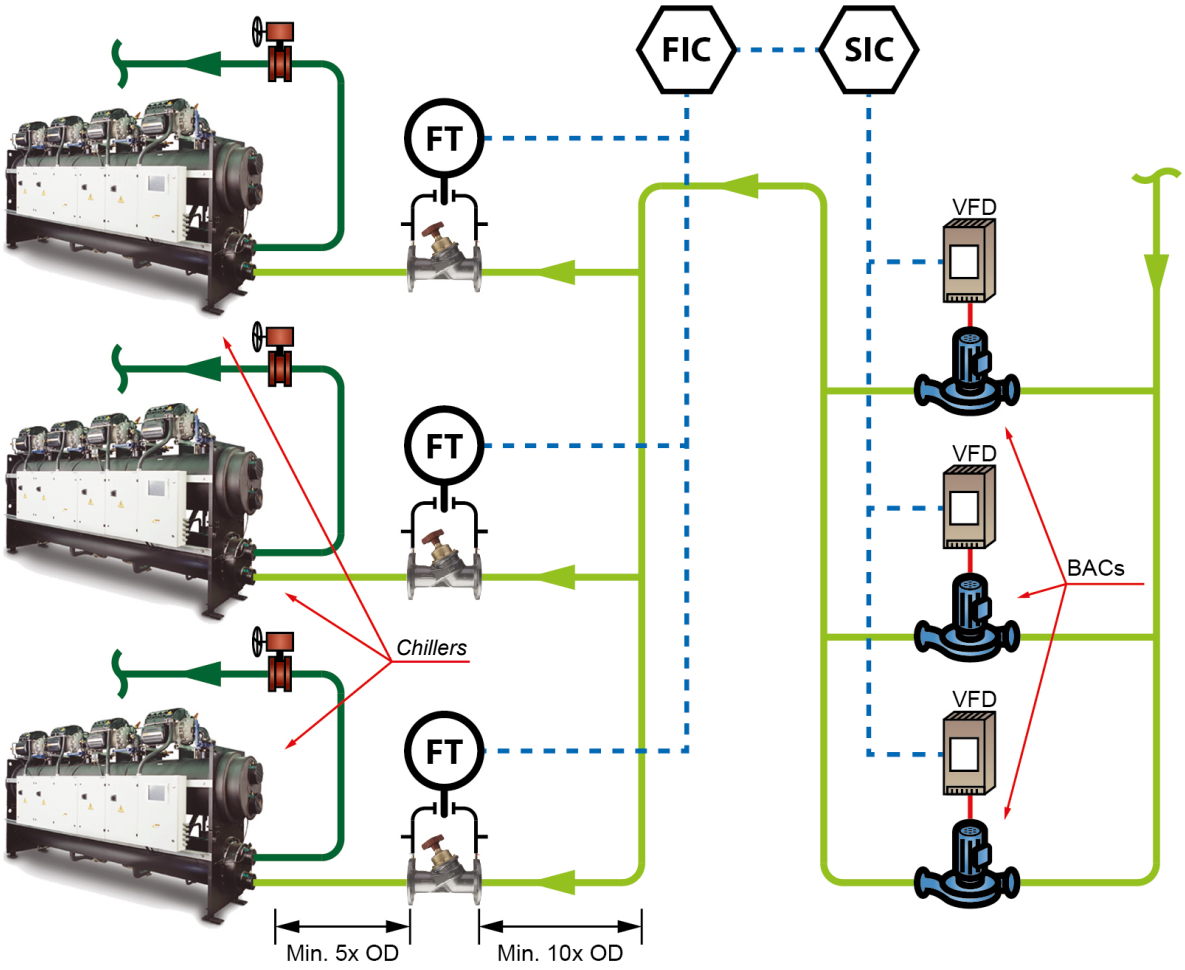
A maioria dos *Chillers* atuais é fornecida com medidor de energia integrado ao painel de controle do *Chiller*, o que permite a leitura das grandezas elétricas do motor do compressor, incluindo a potência ativa. Recomendações:

- O valor da potência ativa atual do painel do *Chiller* deve ser integrado ao sistema de automação por meio de módulo de comunicação de dados com protocolo padrão (normalmente BACnet ou Modbus);
- Se os *Chillers* não possuírem medidores de energia integrados, é altamente recomendável instalar um medidor de energia no painel elétrico de cada *Chiller*;
- Também é recomendável instalar medidores de energia nos painéis elétricos dos motores das bombas e ventiladores as torres de resfriamento. Recomenda-se separar as medições por tipo de bomba (ex. BAGP/ BAGS/ BAC). Em motores com inversores de frequência ou painéis do tipo *soft starter*, é possível obter os dados de potência ativa por meio de módulo de comunicação de dados com protocolo padrão (normalmente BACnet ou Modbus).

4.4.13 CAPACIDADE E CONSUMO DE ENERGIA DOS CONDICIONADORES DE AR

Com a instalação de medidores de vazão e de sensores de temperatura de entrada e saída de água gelada nos condicionadores de ar, é possível monitorar a capacidade atual destes equipamentos.

Figura 34 – Posição recomendada para instalação dos sensores e medidores de vazão de água de resfriamento nos *Chillers*. Fluxograma esquemático do controlador de vazão para *Chillers*



Fonte: Elaboração do autor com fotos dos equipamentos de cortesia de Transcalor Ltda.

Atualmente já está disponível no mercado válvulas de controle de vazão de água gelada com estes sensores integrados e que permitem não apenas a leitura da capacidade atual dos condicionadores de ar, mas a integração ao longo do tempo com registro de dados para obter o consumo mensal de "frio" (energia de resfriamento acumulada) de cada condicionador de ar. Desta forma, é possível calcular a parcela mensal de cada consumidor em relação ao consumo total mensal de energia elétrica do sistema de ar condicionado.

Também é importante monitorar a potência ativa dos ventiladores dos condicionadores de ar e associar à carga térmica atual do edifício.

4.5 SISTEMA DE ÁGUA GELADA – MONITORAÇÃO DE DADOS OPERACIONAIS E GRÁFICOS DE TENDÊNCIAS

Outro requisito importante é a monitoração dos dados operacionais utilizando gráficos de tendência em função do tempo para análise contínua.

É muito importante manter os gráficos de tendência ativos. Isso requer a utilização de um sistema de automação em que a armazenagem de dados seja confiável, com capacidade (memória em disco) suficiente e com integridade dos registros. É muito comum

Quadro 30 – Pontos de medição que devem constar nos gráficos de tendências de um sistema de automação

Ponto de Medição	Grandeza
Capacidade Total do Sistema de Água Gelada	kW ou ton
Capacidade de cada *Chiller*	kW ou ton
Capacidade de cada Circuito Secundário	kW ou ton
Potência Ativa Absorvida de cada *Chillers*	kW
Potência Ativa Absorvida Total dos *Chillers*	kW
Potência Ativa Total das Bombas do Circuito Primário de Água Gelada	kW
Potência Ativa Total das Bombas de cada Circuito Secundário de Água Gelada	kW
Potência Ativa Total das Bombas de Água de Resfriamento	kW
Potência Ativa Total das Bombas de Torres de Resfriamento	kW
Potência Ativa Absorvida Total do Sistema de Água Gelada	kW
COP de cada *Chiller*	kW/kW
COP do Sistema de Água Gelada	kW/kW
Temperatura de Saída de Água Gelada nos *Chillers* – Geral - Circuito Primário	ºC
Temperatura de Entrada de Água Gelada nos *Chillers* – Geral - Circuito Primário	ºC
Temperatura de Saída de Água Gelada de cada *Chiller*	ºC
Temperatura de Alimentação de Água Gelada para os Circuitos Secundários	ºC
Temperatura de Retorno de Água Gelada dos Circuitos Secundários (Barrilete de Retorno).	ºC
Temperatura de Retorno de Água Gelada do Circuito Secundário	ºC
Temperatura de Entrada (Geral) das Torres de Resfriamento	ºC
Temperatura de Saída (Geral) Torres de Resfriamento	ºC
Temperatura de Saída de Água de Resfriamento de cada Torre de Resfriamento	ºC
Temperatura de Bulbo Seco do Ar Externo	ºC
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar Externo	ºC
Umidade Relativa do Ar Externo	%
Vazão de Água Gelada de cada *Chiller*	m³/h
Vazão de Água Gelada de cada Circuito Secundário	m³/h

Fonte: Elaboração do autor.

ocorrer a perda de dados registrados por limitações do sistema de automação.

O Quadro 30 apresenta uma lista básica de pontos de medição necessários que devem constar nos gráficos de tendência de um sistema de automação referentes ao sistema de água gelada.

4.6 SISTEMA DE ÁGUA GELADA – RECOMENDAÇÕES BÁSICAS PARA MEDIDORES DE VAZÃO DE LÍQUIDOS

A seguir algumas recomendações sobre a aplicação de medidores de vazão de líquidos no sistema de água gelada:

- Instalar medidores de vazão e válvulas de balanceamento em trechos retos, com distâncias de pelo menos 10xOD à jusante e 5xOD à montante das singularidades;
- Na ocasião do TAB do sistema de água gelada, é altamente recomendável verificar a medição da vazão em uma larga faixa e comprar com o valor mostrado na tela do BMS (mesmo que seja o caso de vazão constante), utilizando um medidor de vazão de referência (ex: por ultrassom). É muito comum haver grandes diferenças entre a vazão real e o valor mostrado na tela do BMS em determinadas faixas. Isso não se trata da calibração do instrumento mas de configuração no BMS. A tabela 16 mostra um exemplo de discrepâncias entre medições de vazão reais em campo e os valores mostrados na tela do BMS;
- Especificar e instalar medidores de vazão com painel local (com indicação da vazão atual);
- A instalação do medidor pode ser na tubulação de entrada ou de saída do equipamento, pois a vazão é a mesma;
- Para vazão de água variável utilizar apenas medidores de vazão magnéticos ou por ultrassom;
- Em sistemas com vazão constante nos *Chillers*, pode ser utilizado um transmissor de pressão diferencial acoplado à válvula de balanceamento de água gelada do *Chiller*;
- É melhor instalar transmissores de pressão diferencial nas válvulas de balanceamento do que diretamente nos trocadores *Chillers*. Quando não for possível, recomenda-se não se basear na curva teórica (catálogo) do fabricante, mas realizar um levantamento da curva em campo utilizando um medidor de vazão de referência;
- Quando utilizar transmissores de pressão diferencial, a faixa de medição deve ser cuidadosamente selecionada para garantir uma leitura confiável. Normalmente, o valor de fundo de escala recomendado para estes instrumentos deve ser de 50 kPa, quando instalados em válvulas de balanceamento e entre 100 kPa e 200 kPa, quando instalados nos trocadores dos *Chillers* (dependendo da perda de carga na vazão de projeto);
- Neste caso, recomenda-se ainda disponibilizar na tela do BMS a posição de abertura da válvula de balanceamento e o kv atual ao lado da indicação da vazão medida;
- Instalar medidores de vazão de água gelada em cada *Chiller*, para se obter a capacidade atual e COP atual de cada *Chiller*;
- Instalar válvulas de 2 vias de controle de vazão de água gelada nos condicionadores de ar que incluam monitoração de vazão e temperaturas de água gelada (entrada/ saída), para se obter a capacidade atual e COP atual e o consumo mensal de cada condicionador.

A Tabela 16 mostra a comparação dos valores de vazão lidos na tela do sistema de supervisão da automação (BMS) obtidos dos medidores da instalação e os valores obtidos simultaneamente com um medidor de vazão de referência. Por causa das leituras erradas nos medidores da instalação, os valores de capacidade de cada prédio estavam totalmente errados (no prédio 1, o excesso era de 1.400%). Neste sistema, a sequência de entrada em operação dos *Chillers* era por capacidade (*BTU-meter*). Com as leituras erradas, o controle também estava totalmente afetado, e o sistema operava com mais *Chillers* do que o necessário (cinco ao invés de dois). Para evitar o descontrole, a equipe de operação desabilitou a operação em automático e passou a operar em modo manual remoto, porém sem notar que o problema estava nas leituras de vazão no BMS.

Tabela 16 – Discrepâncias entre medições de vazão na tela do BMS e medições reais em campo utilizando medidor de vazão de referência

Prédio	Vazão (na tela do BMS)	Capacidade (na tela do BMS)	Vazão Real	Capacidade Real
	(m³/h)	(ton)	(m³/h)	(ton)
1	750	719	53	51
2	503	998	189	375
3	389	283	359	261
4	431	826	229	439
5	287	256	141	125
Total - SEC	**2.360**	**3.083**	**971**	**1.251**
Total - PRI	**1.350**	**1.339**	**1.235**	**1.225**

Fonte: Elaboração do autor.

4.7 SISTEMA DE ÁGUA GELADA – RECOMENDAÇÕES BÁSICAS PARA CONTROLE DO CIRCUITO SECUNDÁRIO OU PRINCIPAL

A seguir, algumas recomendações sobre o controle de vazão nos circuitos secundário:

- Sempre instalar um transmissor de pressão diferencial para controle de vazão de água gelada do circuito secundário ou principal. Nunca utilizar dois sensores de pressão independentes e fazer o cálculo no BMS;
- O ***ASHRAE Standard 90.1-2013*** requer que o transmissor de pressão diferencial seja instalado no final do circuito ou próximo ao equipamento usuário mais crítico do sistema. Outros métodos tradicionais sugerem instalar a 2/3 de distância das bombas, considerando o comprimento equivalente total da instalação;
- Instalar pontos de medição paralelos (*têes* com conexões) às conexões do transmissor de pressão diferencial, para verificação do ΔP em campo na ocasião do TAB (utilizando um medidor de pressão diferencial de referência) para correta configuração da leitura no BMS;
- O *setpoint* de controle (diferencial de pressão) deve ser definido durante o TAB do sistema de água gelada, após o balanceamento hidrônico. Após a ocupação substancial do edifício, este valor deverá ser revisto, durante um novo processo de TAB do sistema de ar condicionado;
- Especificar e instalar um transmissor de pressão diferencial com painel local (com indicação da vazão atual);
- Quando o sistema possuir vários circuitos secundários, ou principais, ou seja, quando houver ramificações, prumadas distintas, prédios diferentes, circuitos diferentes (que operam em horários distintos, por exemplo), é essencial que para cada circuito seja instalado um conjunto de bombas de distribuição (BAGSs ou BAGMs). Neste caso, cada circuito deverá ter um controlador de pressão diferencial;
- Mesmo que haja um aumento no custo de investimento inicial (valor ínfimo quando comparado ao custo total), o resultado no consumo de energia, na controlabilidade do sistema (conforto do usuário) e na própria manutenção é muito vantajoso;
- De outro modo, o controle vai atender plenamente apenas o circuito onde o transmissor de pressão diferencial for instalado;
- Neste caso, também não é recomendável instalar um transmissor de pressão diferencial em cada circuito e tirar a média ou escolher o menor ΔP

atual. Todas estas medidas são falhas e limitam a operação do sistema, além de resultar em maior consumo de energia;

- Instalar um sensor de temperatura no retorno principal de cada circuito secundário (ou principal) e instalar um sensor de temperatura na alimentação geral dos circuitos secundários (após o *bypass*). Esses dois sensores irão indicar o diferencial de temperatura no circuito, que serve para verificar se o controle de vazão está adequado ou se o sistema opera com vazão excessiva (síndrome de baixo ΔT);
- O item 4.12.3 descreve um exemplo detalhado da lógica de controle de vazão de água gelada no circuito secundário, que pode ser aplicado da mesma forma em circuito único de vazão variável com o conceito de bombas principais (BAGM).

4.8 SISTEMA DE ÁGUA GELADA – RECOMENDAÇÕES BÁSICAS PARA CONTROLE DA SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO DOS *CHILLERS*

A seguir, algumas recomendações sobre a sequência de operação dos *Chillers*:

- Não utilizar o conceito de medição de capacidade do sistema (BTU-meter) para o controle da sequência de entrada em operação dos *Chillers*. Este conceito utiliza como referência a capacidade de projeto de um *Chiller*. Um *Chiller* otimizado com baixa temperatura de água de resfriamento pode atingir até 25% a mais da sua capacidade de projeto. Um *Chiller* com baixo desempenho não irá atingir a capacidade de projeto, o que resultará em aumento da temperatura de alimentação de água para os condicionadores de ar e forçará o operador a abandonar o controle em modo automático para forçar a partida do próximo *Chiller*. Isto acontece frequentemente em sistemas que possuem controle da sequência por capacidade;
- Além disso, o conceito de medição de capacidade para o controle utiliza o medidor de vazão de água gelada e dois sensores de temperatura (alimentação e retorno). Além dos erros comuns apontados no item 4.6, também é comum a instalação dos sensores de temperatura em pontos inadequados;
- Não utilizar o conceito de medição de vazão na tubulação de *bypass* (em sistemas do tipo circuito primário e secundário). Este conceito tem como princípio a monitoração da vazão no *bypass*, de forma que quando o sentido do fluxo no *bypass* inverte, sabe-se que a vazão no circuito secundário é maior que a vazão do circuito primário, ou seja, houve um aumento de carga térmica tal que é necessário adicionar mais um *Chiller* na operação do sistema. Estes parâmetros não são indicativos adequados pelos mesmos motivos citados no conceito de controle por *BTU-meter* e pelo comportamento da vazão no *bypass* em relação à capacidade atual. A Figura 35 mostra um sistema operando com dois *Chillers*, cada um com 100% de carga, na eminência da entrada em operação do terceiro *Chiller* caso haja aumento de carga térmica no sistema. Nesta condição, a vazão total do circuito secundário (caso os condicionadores de ar estiverem operando adequadamente), ao contrário do que se imagina, é bem menor que a vazão total do circuito primário e, como se pode verificar, seria necessário aumentar cerca de 40% a vazão no circuito secundário para que houvesse a mudança do sentido de fluxo e só assim acionar o próximo *Chiller*. Outros aspectos para evitar a utilização deste conceito de controle de sequência de operação dos *Chillers* poderão ser verificados no item 5.3.1;
- A sequência de operação dos *Chillers* deve ser realizada utilizando a temperatura de alimentação de água gelada para os circuitos secundários ou principais, associada à análise de porcentagem de carga (% FLA – corrente) dos *Chillers* em operação. Neste caso, não importa a capacidade atual do *Chiller* nem a sua eficiência, a máxima porcentagem de carga (que é o valor da corrente do motor do compressor para o *Chiller* operando na condição de projeto – FLA) será sempre a mesma, definida na configuração do painel de controle do *Chiller*. Neste caso, o valor de %FLA para acionamento do próximo *Chiller* pode ser variável (ex. 85% ou 93%), em função de vários aspectos operacionais do sistema ou de requisitos do proprietário;
- O item 4.12.2 – **Operação do 2º UR** – mostra um exemplo de lógica para o comando de entrada em operação do próximo *Chiller*;

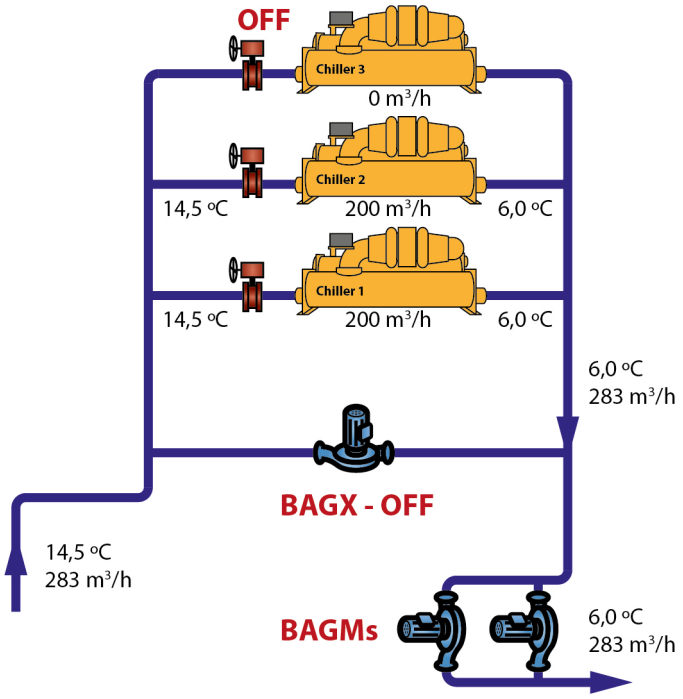
- Na eventualidade de não haver comunicação de dados do painel de controle dos *Chillers* com o sistema de automação (o que deveria ser um requisito de projeto), recomenda-se instalar sensores de corrente no painel elétrico do *Chiller* e configurar no BMS o valor de corrente máxima igual ao valor de FLA configurado no painel do *Chiller*;
- A parada de um *Chiller* deve ser realizada por análise de porcentagem de carga (% FLA – corrente) dos *Chillers* em operação (ex. %FLA < 45%);
- O item 4.12.2 – **Parada do 2º UR** – mostra um exemplo de lógica para o comando de parada de um *Chiller*, quando operando em baixa carga.

4.9 SISTEMA DE ÁGUA GELADA – RECOMENDAÇÕES BÁSICAS PARA LÓGICA DE CONTROLE DA TEMPERATURA DE ÁGUA NA SAÍDA DAS TORRES DE RESFRIAMENTO

A seguir, algumas recomendações sobre a lógica de controle da temperatura de água na saída das torres de resfriamento:

- A temperatura de projeto de saída de água gelada dos *Chillers* é um valor para *setpoint* de controle. Mas a temperatura de projeto de entrada de água de resfriamento nos *Chillers* (saída das torres) NÃO é um valor para *setpoint* de controle. É a temperatura máxima admissível e serve para dimensionamento das torres e condições de máxima carga de funcionamento dos *Chillers*;
- O *setpoint* de controle da temperatura de água resfriamento na entrada dos *Chillers* (saída das torres) deve ser definido com o fabricante dos *Chillers*, em função do modelo;
- *Chillers* com compressores centrífugos permitem temperaturas de entrada de água de resfriamento muito baixas (dependendo do modelo, menor que 10 °C – ver no manual do fabricante);
- *Chillers* com compressores parafuso ou *scroll* não permitem grandes variações e devem ser cuidadosamente analisados (verifique o manual do fabricante);
- O item 6.5 do Volume I – Controle da Temperatura de Água de Resfriamento – trata com mais detalhes sobre os aspectos de eficiência energética do sistema de água gelada operando com baixa temperatura de saída de água das torres de resfriamento;
- A instalação de válvulas de bloqueio motorizadas – VBMs – na entrada de água das torres de resfriamento é um item importante a ser considerado no projeto do circuito de água de resfriamento, pois assim como os *Chillers*, as torres de resfriamento possuem limites de vazão mínima e vazão máxima. Especialmente a vazão mínima é um parâmetro importante para evitar o acumulo de incrustação no enchimento da torre;

Figura 35 – Sistema de água gelada com circuito primário e secundário, com dois *Chillers* operando com 100% de capacidade para atender a carga térmica atual do edifício (67%), na eminência da entrada em operação do terceiro *Chiller*



Fonte: Elaboração do autor.

- Com a inclusão das VBMs, é preciso incluir a abertura e o fechamento das válvulas na lógica de sequência de entrada de operação dos *Chillers*, pois se trata de bloqueio no circuito de água de resfriamento do *Chiller*. A lógica de acionamento dos ventiladores apenas verifica a posição de abertura das válvulas de bloqueio. Os itens 4.12.2 e 4.12.5 descrevem um exemplo detalhado das lógicas de controle relacionando as VBMs com os *Chillers* e ventiladores das torres de resfriamento;
- Com a inclusão das VBMs na entrada de água das torres de resfriamento, nem sempre é necessário incluir VBMs na saída de água das torres, porém é muito importante garantir a equalização adequada entre as bacias das torres. Para isso, recomenda-se não subdimensionar a linha de equalização e utilizar o mesmo diâmetro da conexão de saída de água da bacia da torre para as conexões e linhas de equalização.

4.10 SISTEMA DE ÁGUA GELADA – RECOMENDAÇÕES BÁSICAS PARA OTIMIZAÇÃO DA CAG

A seguir, algumas recomendações sobre para a otimização da CAG:

- Os equipamentos permitem ajustes de *setpoint* ao longo do ano que podem melhorar ainda mais o desempenho do sistema de água gelada;
- A temperatura de água gelada pode ser alterada até ~10,0 ºC durante os períodos mais frios/secos do ano, o que resulta no aumento do COP dos *Chillers*;
- Em sistemas com circuito primário e secundário, é possível variar a vazão de água gelada nos *Chillers* (instalando inversores de frequência nas BAGPs). Isso não afeta o COP dos *Chillers*, mas diminui o consumo de energia nas BAGPs;
- A temperatura de água de resfriamento mais baixa requer mais tempo de funcionamento dos ventiladores das torres (ou maior frequência quando houver inversores), mas reduz a potência absorvida nos *Chillers* (que é cerca de 20 vezes maior que a potência dos ventiladores das torres);
- É essencial realizar um estudo de otimização de operação dos *Chillers*, BACs e torres de resfriamento, em função da carga parcial e da temperatura de bulbo ao longo do ano, para implementar na lógica de controle, valores de *setpoints* de controle sazonais da temperatura de saída de água de resfriamento das torres e da vazão de água de resfriamento (em sistemas com inversores nas BACs);
- Quando possível, é preferível operar com uma quantidade de torres de resfriamento maior do que a quantidade de *Chillers* em operação (quando as torres forem dimensionadas uma para cada *Chiller*). Porém, esta definição depende da análise da vazão mínima permitida em cada torre de resfriamento (ver item 4.9) para verificar se é possível implantar na lógica de operação. Por exemplo, em um sistema com quatro *Chillers* e quatro torres de resfriamento, talvez não seja possível operar duas torres com apenas um *Chiller* (cada torre com metade da vazão de projeto), porém é possível a operação de três torres com dois *Chillers* (cada torre com 67% da vazão de projeto) e quatro torres com três *Chillers*.

4.11 LÓGICAS DE CONTROLE – FLUXOGRAMAS DE ENGENHARIA

O memorial descritivo das lógicas de controle é um dos documentos mais importantes do projeto de um sistema de ar condicionado, pois será utilizado como referência para o desenvolvimento do sistema de controle e automação e será a base para a execução dos testes de desempenho funcional no campo (ver item 3.9).

Para a elaboração de um memorial descritivo das lógicas de controle, é essencial a execução de um fluxograma de engenharia detalhado do sistema de água gelada contendo os equipamentos, as interligações hidráulicas, os sensores e elementos de controle e as malhas de controle ainda que de maneira simplificada, mas que servirá de orientação para melhor entendimento das lógicas pelos profissionais que utilizarão estes documentos.

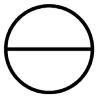
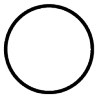
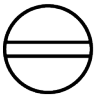
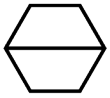
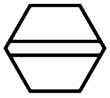
O ***ANSI/ISA Standard 5.1-2009 - Instrumentation Symbols and Identification***, publicado pela International Society of Automation – ISA, oferece uma simbologia muito apropriada a ser aplicada na elaboração de fluxogramas de engenharia com as malhas de controle integradas, que permite uma ótima visualização prévia das rotinas de controle e

a interação dos vários elementos de controle e monitoramento com os equipamentos do sistema de água gelada e com o sistema de automação.

Utilizando a simbologia disponível, é possível identificar os seguintes detalhes no fluxograma de engenharia:

- Tipo de elemento sensor (ou transmissor) utilizado;
- Posição onde o elemento sensor está instalado e a locação de suas funções nos componentes do sistema de automação (leitura de campo, painel dos equipamentos, controladores locais ou sistema de supervisão). O Quadro 31 mostra os principais símbolos que indicam a locação de um elemento ou de suas funções;
- Tipos de interligações dos elementos sensores com os demais elementos do sistema de automação e os tipos de sinais enviados ou recebidos – sinal digital, sinal analógico, comunicação de dados com controladores, comunicação com o sistema de supervisão. A Figura 37 mostra exemplos de interligações;
- Funções do elemento no sistema de automação – apenas leitura, apenas *switch*, controle integrado, registro de dados, relé, *setpoint*, alarme, falha. O Quadro 32 mostra exemplos de notação dos elementos e das suas funções;
- Malhas de controle entre os sensores e demais componentes do sistema de água gelada (equipamentos, válvula e demais dispositivos de regulagem) envolvendo os sinais e os intertravamentos de *software* do sistema de automação e os intertravamentos elétricos conectados aos painéis elétricos dos equipamentos.

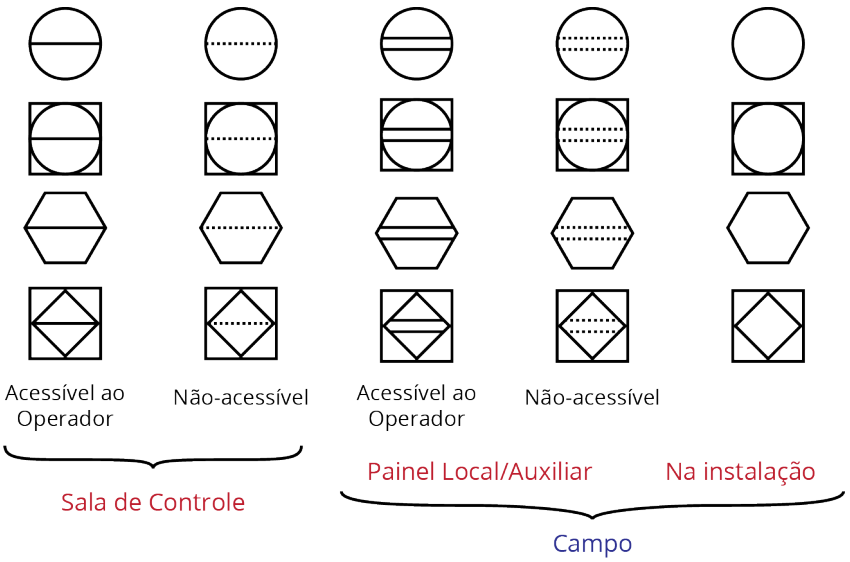
Quadro 31 – Símbolos indicativos de locação de um elemento ou de suas funções

	Locação Principal Acessível ao Operador	Elemento de Campo	Locação Auxiliar Acessível ao Operador
Instrumento Discreto			
Controle/Display Compartilhado			
Computador			
Controle Lógico Programavél/ Intertravamento			

Fonte: ANSI, 2009.

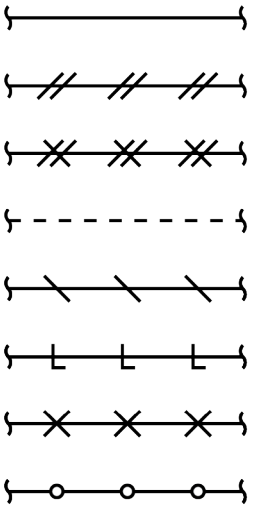
A Figura 36 mostra um exemplo da divisão típica de locações de um elemento ou de suas funções.

Figura 36 – Divisão típica de locações de um elemento ou de suas funções



Fonte: ANSI, 2009.

Figura 37 – Tipos de interligações dos elementos sensores com os demais elementos do sistema de automação e os tipos de sinais enviados ou recebidos



Linha de processo

Sinal pneumático

Sinal discreto pneumático

Sinal elétrico analógico

Sinal elétrico discreto

Sinal hidráulico

Tubo capilar

Sinal configurado internamente ou
Sinal digital (protocolo digital

Fonte: ANSI, 2009.

Quadro 32 – Notação dos elementos sensores ou transmissores e suas funções

1ª Letra	Grandeza	Controlador			Dispositivo de Leitura		*Switch* e Dispositivo de Alarme/ Falha		Transmissor	Elemento Primário	Solenoide/ Relés
		Registro de Dados	Indicação	Válvulas Auto Controladas	Indicação	Registro de Dados	Alta	Baixa	Sem Indicação		
F	Vazão	FRC	FIC	FCV	FI	FIR	FSH/ FAH/ FAHH	FSL/ FAL/ FALL	FT	FE	FY
I	Corrente	IRC	IIC		II	IIR	ISH/ IAH/ IAHH	ISL/ IAL/ IALL	IT	IE	IY
J	Potência	JRC	JIIC		JI	JIR	JSH/ JAH/ JAHH	JSL/ JAL/ JALL	JT	JE	JY
K	Tempo	KRC	KIC	KCV	KI	KIR	KSH/ KAH/ KAHH	KSL/ KAL/ KALL	KT	KE	KY
L	Nível	LRC	LIC	LCV	LI	LIR	KSH/ KAH/ KAHH	KSL/ KAL/ KALL	LT	LE	LY
P	Pressão	PRC	PIC	PCV	PI	PIR	PSH/ PAH/ PAHH	PSL/ PAL/ PALL	PT	PE	PY
PD	Diferencial de Pressão	PDRC	PDIC	PDCV	PDI	PDIR	PDSH/ PDAH/ PDAHH	PDSL/ PDAL/ PDALL	PDT	PE	PDY
Q	Quantidade/ Capacidade	QRC	QIC		QI	QIR	QSH/ QAH/ QAHH	QSL/ QAL/ QALL	QT	QE	QY
S	Velocidade/ Frequência	SRC	SIC	SCV	SI	SIR	SSH/ SAH/ SAHH	SSL/ SAL/ SALL	ST	SE	SY
T	Temperatura	TRC	TIC	TCV	TI	TIR	TSH/ TAH/ TAHH	TSL/ TAL/ TALL	TT	TE	TY
TD	Diferencial de Temperatura	TDRC	TDIC	TDCV	TDI	TDIR	TDSH/ TDAH/ TDAHH	TDSL/ TDAL/ TDALL	TDT	TDE	TDY
Y	Evento/ *Status*	---	---	---	YI	YIR	YSH/ YAH/ YAHH	YSL/ YAL/ YALL	YT	YE	YY
Z	Posição	ZRC	ZIC	ZCV	ZI	ZIR	ZSH/ ZAH/ ZAHH	ZSL/ ZAL/ ZALL	ZT	ZE	ZY

Fonte: ANSI, 2009.

4.12 LÓGICAS DE CONTROLE – SISTEMA DE ÁGUA GELADA COM CIRCUITO PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO

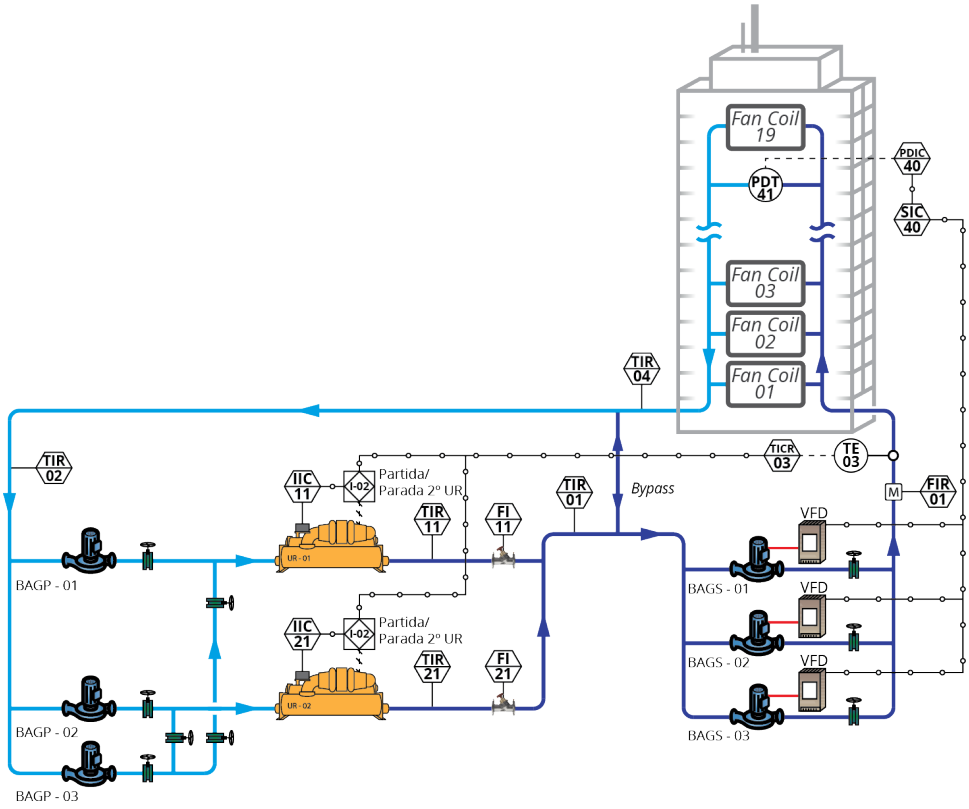
Nos itens 4.12.2 a 4.12.7, é apresentado um exemplo do descritivo das lógicas de controle de um sistema real, com circuito primário e secundário de água gelada, com as seguintes características:

- 2 URs – *Chillers* com condensação a água;
- 3 BAGPs – Bombas de água gelada do circuito primário, dedicadas uma para cada *Chiller* em funcionamento e uma reserva;
- 3 BAGSs – Bombas de água gelada do circuito secundário, duas operantes e uma reserva;
- 3 BACs – Bombas de água de resfriamento, com recalque para um barrilete comum (qualquer BAC atende qualquer *Chiller*), com uma bomba reserva;
- 3 TRs – Torres de resfriamento e seus ventiladores (VTRs), com a possibilidade de operar as três torres simultaneamente;
- 3 VBM-URs – Válvulas de bloqueio motorizadas, na tubulação de entrada de água de resfriamento de cada *Chiller*;
- 3 VBM-TRs – Válvulas de bloqueio motorizadas, na tubulação de entrada de água de resfriamento de cada torre.

4.12.1 FLUXOGRAMAS DE ENGENHARIA DO SISTEMA DE ÁGUA GELADA

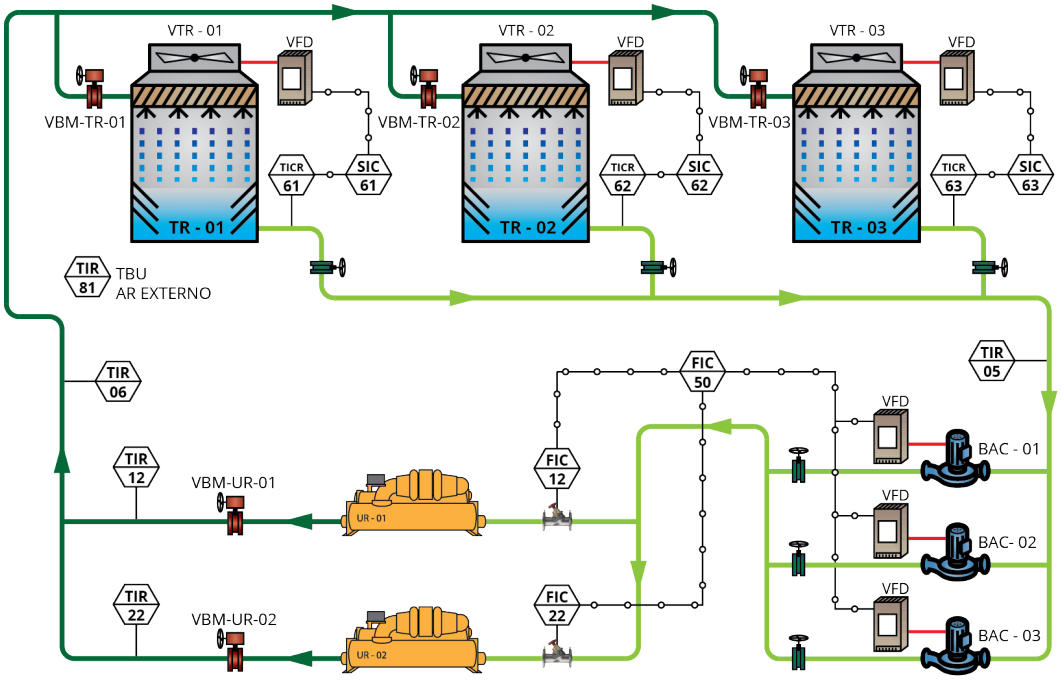
As Figuras 38 e 39 apresentam os fluxogramas esquemáticos dos circuitos de água gelada e do circuito de água de resfriamento do sistema utilizado para este exemplo, com os principais equipamentos e elementos de controle do sistema, utilizando a simbologia do ***ANSI/ISA Standard 5.1*** de maneira simplificada, para fins ilustrativos do descritivo das lógicas apresentadas.

Figura 38 – Fluxograma de engenharia esquemático da CAG – circuitos de água gelada



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 39 – Fluxograma de engenharia esquemático da CAG – circuito de água de resfriamento



Fonte: Elaboração do autor.

4.12.2 SEQUÊNCIA DE ENTRADA EM OPERAÇÃO DOS *CHILLERS* – MODO DE OPERAÇÃO AUTOMÁTICO

No modo de operação automático, todo sistema de água gelada opera sobre o controle do sistema de automação.

REQUISITOS PRELIMINARES PARA A OPERAÇÃO DO SISTEMA

Deverá ser estabelecida uma sequência de partida dos **grupos dos *Chillers* (URs)** com os seguintes componentes:

- 1 UR;
- 1 BAGP (dedicada ao *Chiller* em funcionamento ou BAGP reserva);
- 1 BAC (qualquer – em função da sequência de partida ou BAC reserva);
- 1 VBM-UR na tubulação de saída de água de resfriamento do *Chiller* em funcionamento;
- 1 VBM-TR na tubulação de entrada de água de resfriamento da torre em funcionamento (definida pela sequência de partida dos grupos das Torres).

Deverá ser estabelecida uma sequência de partida dos **grupos das torres de resfriamento** com os seguintes componentes:

- 1 TR e seu ventilador (VTR);
- 1 VBM-TR na tubulação de entrada de água de resfriamento da torre em funcionamento.

FUNCIONALIDADE DO SISTEMA

- Cada *Chiller* possui uma BAGP dedicada, exceto quando opera a BAGP-03, reserva.
- As BACs não são dedicadas aos *Chillers* (arranjo em barrilete). Portanto, qualquer BAC pode operar com qualquer *Chiller* e dependem apenas da sequência de partida das BACs previamente definida, para operação conjunta com a atual sequência de partida dos *Chillers*. A última BAC na sequência de partida atual será definida como BAC reserva e em caso de falha de alguma BAC, a BAC reserva entrará em operação.
- Cada *Chiller* possui uma VBM-UR dedicada.

- Cada torre de resfriamento possui uma VBM-TR dedicada. Os VTRs (ventiladores da torre) só entrarão em funcionamento quando houver fluxo de água de resfriamento pela respectiva TR (VBM-TR aberta). As rotinas da sequência de operação dos ventiladores das torres estão descritas no item 4.12.5.
- As VBM-TRs não são dedicadas aos *Chillers* (ex. VBM-TR-01 com UR-01), mas, para que um *Chiller* entre em funcionamento, é necessário que haja pelo menos uma VBM-TR aberta. Para "N" *Chillers* em funcionamento é necessário que haja pelo menos "N" VBM-TRs abertas. A sequência de abertura das VBM-TRs é definida pela sequência dos grupos de torres.
- A sequência de partida dos grupos dos *Chillers* e das torres de resfriamento será estabelecida pelo operador.
- O controlador TICR-03 (do sensor TE-03) em conjunto com os controladores de corrente dos *Chillers* em operação (IIC-11 e IIC-21) atuam sobre os comandos de partida e parada dos grupos de *Chillers*.
- O controlador PDIC-40 (do sensor PDT-41) atua sobre o controlador SIC-40 para o controle de frequência dos inversores das BAGSs em operação, de modo a manter o *setpoint* de pressão diferencial no PDT-41.
- O controlador FIC-50 (dos medidores de vazão FIR-12 e FIR-22) atua sobre o controlador SIC-50 para o controle dos inversores das BACs em operação de modo a manter o *setpoint* de vazão de água de resfriamento nos *Chillers*.
- Os controladores TICR-61/ TICR-62 e TICR-63 atuam respectivamente sobre os controladores SIC-61/ SIC-62/ SIC-63 para o controle dos inversores dos VTRs em operação de modo a manter o *setpoint* de temperatura de água de resfriamento na saída das torres de resfriamento.

INÍCIO DE OPERAÇÃO

- A partir de um sinal de liberação de operação da CAG e/ou por meio de programação horária, haverá a solicitação de operação dos seguintes componentes:
  - BAGP dedicada ao 1 ºUR da sequência de partida;
  - 1ª BAGS da sequência de partida do circuito secundário.

OPERAÇÃO DO 1º UR

- Com os circuitos secundários e a 1ª BAGP em funcionamento, haverá o aumento de temperatura da água gelada indicada no sensor TE-03 (com *setpoint* de projeto no TICR-03 de 6,0ºC e faixa de zona neutra de +/- 0,5 ºC). Será então iniciado o processo de partida do 1ºUR.
- Caso o resumo de falha do 1º UR estiver ativo (*Chiller* em falha), então será alterada a sequência de partida atual e o 2º UR na sequência atual passará a ser o 1º UR. Neste caso será solicitada a parada da BAGP dedicada ao 1º UR e solicitado o funcionamento da BAGP dedicada ao 2º UR.
- Para o 1º UR é necessário que todos os elementos do 1º Grupo (auxiliares à sua operação) estejam em funcionamento ou na posição solicitada para que o 1º UR possa funcionar.
- Portanto, após liberada a solicitação de partida do 1º UR, os elementos do 1º Grupo serão acionados, rigorosamente na seguinte sequência:
  - i) Partida da BAGP dedicada ao 1º UR, com confirmação de funcionamento (já em operação);
  - ii) Partida da 1ª BAC, conforme a sequência de partida, com confirmação de funcionamento;
  - iii) Abertura total (100%) da VBM-UR dedicada ao 1ºUR, com confirmação de posição **E** (simultaneamente) a abertura total (100%) da 1ª VBM-TR, conforme a sequência de partida, com confirmação de posição.
- Com a confirmação dos indicadores acima, será liberado o sinal de partida do 1º UR. Caso estiver pronto para partir, com as proteções elétricas liberadas (ex. sensor de fluxo de água gelada/ água de resfriamento, por meio painel de controle do *Chiller*), o 1º UR entrará em operação, com confirmação de funcionamento.
- Com o 1º UR em funcionamento, a capacidade do mesmo modula em função do *setpoint* da temperatura de saída de água gelada estabelecido no painel de controle do 1º UR, conforme a necessidade de carga térmica do edifício.

OPERAÇÃO DO 2º UR

- Com um *Chiller* em operação, caso haja um aumento de capacidade no sistema e for necessária a operação do próximo *Chiller*, deverão ser verificadas as seguintes condições:
  - Se o 1º UR atingir **97% de carga** (% FLA – valor configurável, a ser verificado por meio módulo de comunicação de dados entre o *Chiller* e o sistema de automação) e se a temperatura de água gelada no TICR-03 estiver **acima do** *setpoint* (>6,0 ºC), inicia-se o processo de entrada em operação do 2º UR com a ativação de um temporizador (181 s – valor configurável).
  - Se o 1º UR atingir **89% de carga** (% FLA – valor configurável, a ser verificado através do módulo de comunicação de dados entre o *Chiller* e o sistema de automação) e se a temperatura de água gelada no TICR-03 estiver **acima do** valor superior da faixa de zona neutra do *setpoint* (>6,5 ºC), inicia-se o processo de entrada em operação do 2º UR com a ativação de um temporizador (307 s – valor configurável);
  - Independente da carga atual do 1º UR se a temperatura de água gelada no TICR-03 estiver 1,7 ºC (valor configurável) **acima do** *setpoint* (>7,7 ºC), inicia-se o processo de entrada em operação do 2 ºUR com a ativação de um temporizador (1.201 s – valor configurável);
- Ao final da contagem de cada temporizador, se uma das condições acima se mantiver será enviado um sinal de solicitação de partida do 2º UR.
- O sinal de solicitação de partida será por pulso, ou seja, após o envio do sinal de solicitação de partida do 2º UR, a lógica de verificação de carga do 1º UR (com as condições acima) deve ser desativada. Essa lógica de verificação só será ativada novamente quando apenas o 1º UR estiver em operação.
- Caso o resumo de falha do 2º UR estiver ativo (*Chiller* em falha), as rotinas para a solicitação de partida do 2º UR serão canceladas e o sistema continuará operando com apenas o 1º UR .
- Após liberada a solicitação de partida do 2º UR, serão acionados os elementos do 2º Grupo, rigorosamente na seguinte sequência:
  - i) Partida da BAGP dedicada ao 2º UR, com confirmação de funcionamento;
  - ii) Partida da 2ª BAC, conforme a sequência de partida, com confirmação de funcionamento;
  - iii) Abertura total (100%) da VBM-UR dedicada ao 2º UR, com confirmação de posição e (simultaneamente) a abertura total (100%) da 2ª VBM-TR, com confirmação de posição. Caso a 2ª VBM-TR já esteja aberta (ver item 4.12.5), não será necessário inicialmente solicitar a abertura da 3ª VBM-TR.
- Com a confirmação dos indicadores acima, será liberado o sinal de partida do 2º UR. Caso estiver pronto para partir, com as proteções elétricas liberadas (ex. sensor de fluxo de água gelada/água de resfriamento, através painel de controle do *Chiller*), o 2º UR entrará em operação, com confirmação de funcionamento.
- Com os dois *Chillers* em funcionamento, estes operam modulando a capacidade, em função do *setpoint* da temperatura de saída de água gelada estabelecido no painel de controle de cada UR, conforme a carga térmica atual do edifício.

PARADA DO 2º UR

- Com dois *Chillers* em funcionamento, caso a carga térmica venha a diminuir de modo tal que a **somatória** das porcentagens de corrente nos *Chillers* (% FLA) seja menor que 95% (valor a ser configurado em campo) e a temperatura no TICR-03 esteja menor que o limite superior da zona neutra (< 6,5 ºC), será ativado um temporizador (181 s – valor configurável).
- Se ao final da contagem do temporizador, a somatória da %FLA continuar baixa, será então solicitada a parada do 2º UR e em seguida, a partir da confirmação de parada do 2º UR, os elementos do 2º Grupo também deverão parar.
- Com a parada do 2º UR, então, a seguinte sequência de operação deverá ser rigorosamente seguida para a parada dos demais equipamentos do 2º Grupo:
  - i) Parada da BAGP dedicada ao 2º UR, com confirmação de parada;
  - ii) Fechamento total (0%) da VBM-UR dedicada ao 2º UR, com confirmação de posição;
  - iii) Ativação de um temporizador (119 s – valor configurável) antes da parada da 2ª BAC;

iv) Parada da 2ª BAC, conforme a sequência de partida, com confirmação de parada;

v) A 2ª VBM-TR inicialmente será mantida aberta e o seu fechamento será em função da lógica de controle dos VTRs (ver item 4.12.5).

PARADA DO 1º UR

- A **solicitação de parada** do 1º Grupo será realizada apenas pela programação horária ou pelo comando do operador para desabilitar a operação dos *Chillers*.
- Será então solicitada a parada do 1º UR e, em seguida, a partir da confirmação de parada do 1ºUR, os elementos do 1º Grupo também deverão parar, conforme a seguir:

  i) Parada da BAGP dedicada ao 1º UR, com confirmação de parada;

  ii) Ativação de um temporizador (119 s – valor configurável) antes da parada da 1ª BAC;

  iii) Parada da 1ª BAC, conforme a sequência de partida, com confirmação de parada;

  iv) Fechamento total (0%) da VBM-UR dedicada ao 1ºUR, com confirmação de posição.
- Com a parada de todas as BACs, será solicitada a parada de todos os eventuais grupos de torres em funcionamento, com a parada dos VTRs em funcionamento (com confirmação de parada) e o fechamento total (0%) das VBM-TRs que estiverem abertas (com confirmação posição).
- Se o sistema estiver operando com **baixa carga térmica** (dentro do horário normal de funcionamento e com o **1º Grupo habilitado**), de tal modo que o 1º UR parar por baixa capacidade (não por falha), será solicitada a parada apenas da 1ª BAC, o fechamento da VBM-UR dedicada ao 1º UR e o fechamento das VBM-TRs que estiverem abertas. A BAGP dedicada ao 1º UR continuará em funcionamento normal, em conjunto com a BAGS operante do circuito secundário.
- Nesta condição, caso a temperatura no TICR-03 voltar a aumentar, será solicitada novamente a operação do 1º UR (e respectivos elementos do 1º Grupo), que só entrará novamente em operação quando cumpridas as condições internas do painel de controle do *Chiller* (ex. temporizador anticiclagem do motor) para nova partida. Como não se trata de Falha no 1º UR, não se deve solicitar a partida do 2º UR, nem alterar a sequência de partida dos grupos.

CONDIÇÕES DE FALHA

- Com dois *Chillers* em funcionamento, havendo uma condição de falha em um elemento **dedicado** a um determinado *Chiller* (UR/ BAGP/ VBM-UR), e o respectivo *Chiller* parar, então este grupo deverá ser imediatamente classificado como 2º Grupo e será executada a sequência de parada dos demais elementos, conforme a sequência de **parada do 2º UR**. Neste caso, o sistema segue operando com apenas um *Chiller*.
- Com um *Chiller* em funcionamento, havendo uma condição de falha em qualquer elemento **dedicado** ao *Chiller* (UR/ BAGP/ VBM-UR), e o respectivo *Chiller* parar, então será executada a sequência de parada dos demais elementos, conforme a **sequência de parada do 1º UR**.
- O acionamento do próximo Grupo na sequência de partida será em função do aumento de temperatura no TICR-03.
- É importante observar que nas situações de falha de BAC, como o sistema opera em barrilete, a BAC reserva poderá entrar automaticamente em operação antes de ocorrer alguma falha no *Chiller*. Portanto, em caso de falha em BAC, se com a entrada da BAC reserva, o *Chiller* continuar operando, não haverá a rotina de parada do grupo.
- Neste caso, será enviada uma mensagem de falha ao sistema de supervisão e a BAC em falha só voltará a operar normalmente após sair da condição de falha e apenas após a parada do respectivo grupo, quando for solicitada nova partida deste. Enquanto isso, este grupo segue operando com a BAC reserva.
- Em caso de falha de uma BAGP, o UR e todo grupo será desligado. A **BAGP-03 (reserva)** não entrará automaticamente, pois ela não possui válvulas de bloqueio motorizadas para manobra automática antes do seu acionamento. Neste caso, será enviada uma mensagem de falha ao sistema de supervisão e caberá à equipe de operação verificar em campo a condição de falha. Quando o *reset* for imediato (ex. queda por sobre corrente), a BAGP voltará a operar normalmente após liberação do operador.

- Se a BAGP permanecer em falha, o operador deverá ir ao painel elétrico da BAGP em falha e posicionar a chave seletora no modo parado (ou manutenção). Em seguida, deve proceder com a manobra das válvulas de bloqueio manual para operação da **BAGP-03 (reserva)**, em substituição da BAGP em falha e posicionar no painel elétrico da **BAGP-03** a chave seletora para operação em modo remoto.
- Com a chave seletora da **BAGP-03** selecionada para operação em modo remoto, o operador deverá selecionar no sistema de supervisão a **BAGP-03** como operante no grupo onde a BAGP em falha operava, e esta passará a operar automaticamente naquele grupo.
- A BAGP em falha só voltará a operar normalmente após sair da condição de falha e com o respectivo grupo parado. Nesta condição, o operador deverá proceder novamente com a manobra das válvulas de bloqueio manual e em seguida desativar a **BAGP-03 (reserva)** e habilitar a BAGP normal no painel elétrico e na tela do BMS.
- Em caso de falha de abertura ou fechamento de uma VBM-UR, o respectivo UR deverá parar por falha. A continuidade em operação da BAC do respectivo grupo dependerá do controle de vazão de água de resfriamento nos demais *Chillers* em operação (ver item 4.12.3).
- Quando o problema não for de resolução imediata, recomenda-se a operação em modo manual local do grupo, com os procedimentos de partida ou parada do grupo em função da sequência de partida ou parada do mesmo.
- Como alternativa, pode-se optar pela abertura total desta válvula em modo manual (no campo). Neste caso, será ainda necessária a operação em modo forçado de pelo menos uma BAC e uma VBM-TR assim que a CAG for habilitada pela programação horária.
- Com **apenas o 1º UR** em funcionamento, **se apenas a 1ª VBM-TR** estiver aberta, em caso de falha de abertura da válvula que force o seu fechamento, então será alterada a sequência de partida dos grupos das torres e a VBM-TR em falha será definida como a **3ª VBM-TR**. Imediatamente será solicitada a abertura da nova 1ª VBM-TR. Caso, durante a transição, o 1º UR parar por falha de falta de fluxo, será considerada a falha no 1º UR, então será mantida a sequência de partida atual e será solicitada a partida do 2º UR (2º Grupo).
- Se duas ou mais VBM-TRs estiverem abertas, em caso de falha de abertura de uma das válvulas que force o seu fechamento, deverá ser acionada a abertura da próxima VBM-TR. Neste caso, não deve haver parada dos *Chillers* em funcionamento.
- Quando uma VBM-TR entrar em falha, o VTR da respectiva torre de resfriamento será desabilitado para operar em modo automático. Neste caso, será necessário que o operador realize a abertura manual da VBM-TR da respectiva célula e após indicar posição de abertura forçada da válvula (na tela do BMS), o VTR da respectiva torre poderá ser novamente liberado para operar em modo automático.
- Em caso de falha por nível crítico no tanque de equalização das bacias das torres de resfriamento, todas as BACs serão desligadas por nível crítico, assim como todos os grupos de *Chillers*. Será ainda enviada uma mensagem de falha geral ao sistema de supervisão. Deve-se observar que esta é uma condição crítica de emergência, portanto, será acionado um alarme sonoro de aviso à sala de controle e à sala de manutenção.
- Em caso de falha por nível crítico no tanque de expansão do circuito de água gelada, todas as BAGPs e BAGSs serão desligadas por nível crítico, assim como todos os grupos dos *Chillers*. Será ainda enviada uma mensagem de falha geral ao sistema de supervisão. Deve-se observar que esta é uma condição crítica de emergência, portanto, será acionado um alarme sonoro de aviso à sala de controle e à sala de manutenção.
- Em caso de falha no sensor TE-03, o modo de operação automático será desativado e será necessário realizar toda operação de acionamento dos *Chillers* no modo manual remoto. Será ainda enviada uma mensagem de falha geral do modo automático dos *Chillers* ao sistema de supervisão.

4.12.3 CONTROLE DE VAZÃO DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO NOS *CHILLERS*

Os *Chillers* operam com vazão de água de resfriamento constante, porém, devido ao longo trecho de tubulação até as torres, haverá uma tendência de variação acentuada da vazão em cada *Chiller* em operação, em função da quantidade de *Chillers* em

operação. Portanto, para manter a vazão constante nos *Chillers* em operação e evitar a sobre corrente nos motores das BACs no caso de apenas um *Chiller* em operação, será necessário um controle de vazão sobre os inversores de frequência das BACs.

O controle de frequência sobre os inversores das BACs será realizado indiretamente pelo *setpoint* estabelecido no controlador de vazão total de água de resfriamento nos *Chillers* em operação. Cada *Chiller* possui um transmissor de vazão, acoplado à respectiva válvula de balanceamento do fluxo de água de resfriamento. O *setpoint* de vazão total de água de resfriamento será em função da quantidade de *Chillers* em operação, conforme a seguinte equação:

$$\textbf{FIC-50} = V_{total} = N_{URs\ em\ operação} \times 503\ m^3/h$$

A seguir, o descritivo da lógica de controle:

- Com a solicitação de partida do 1º UR, a 1ª BAC deve entrar em operação para atender o valor do *setpoint* atual do FIC-50 (ex. 503 m³/h), que definirá o sinal analógico do controlador SIC-50, que é enviado ao inversor de frequência da 1ª BAC, de modo a aumentar a frequência do motor e atender a vazão total do circuito.
- Com a solicitação de partida do 2º UR, no momento da entrada em operação da 2ª BAC e durante a abertura da VBM-UR dedicada ao 2º UR haverá uma tendência de oscilação de vazão. Para evitar um descontrole momentâneo e uma redução abrupta da vazão de água de resfriamento do 1º UR, no período de tempo entre a solicitação de partida da 2º BAC e a confirmação de posição de abertura da VBM-UR dedicada ao 2º UR e a confirmação de posição de abertura da 2ª VBM-TR, o valor do sinal do controlador SIC-50 deverá ser "congelado".
- Para isso, quando o sistema estiver operando com apenas o 1º UR e este atingir a condição de máxima capacidade e ativar um temporizador para a solicitação de partida do 2º UR (ver item 4.12.2 – **Operação do 2º UR**), o sinal analógico do controlador SIC-50 será mantido constante até que a entrada em operação da 2º BAC com a confirmação de posição de abertura da VBM-UR dedicada ao 2º UR e a confirmação de posição de abertura da 2ª VBM-TR .
- Após estabelecido o regime estável, com dois *Chillers* em operação, o valor do *setpoint* atual do FIC-50 (ex. 1.007 m³/h), definirá o sinal analógico do controlador SIC-50, que é enviado aos inversores de frequência das duas BACs em operação, para atender a vazão total do circuito. O controlador SIC-50 deverá enviar o **mesmo sinal** para os inversores de frequência das duas BACs em operação, para garantir que as bombas operem sempre com a mesma frequência.

CONDIÇÕES DE FALHA

- Conforme mencionado no item 4.12.2, nas situações de falha de BAC, como o sistema opera em barrilete, a BAC reserva poderá entrar automaticamente em operação antes de ocorrer alguma falha no *Chiller*. Portanto, em caso de falha em BAC, se com a entrada da BAC reserva o *Chiller* continuar operando, não haverá a sequência de parada do grupo.
- Em caso de falha em alguma BAC operante, o valor do SIC-50 será mantido na frequência atual (no momento da falha). Com a partida imediata da BAC reserva, quando esta atingir a mesma frequência do valor do SIC-50 atual, então o SIC-50 poderá novamente ser alterado para atender o valor atual de vazão total do FIC-50.
- Em caso de **falha de fechamento de uma VBM-UR**, o respectivo UR deverá parar por falha. Com a parada da BAC do respectivo grupo, haverá uma redução do valor do *setpoint* no FIC-50 (com a redução de *Chillers* em operação). Nesta situação, será ativado um temporizador (127 s – valor configurável). Se ao final do tempo a vazão no FIC-50 não for atendida, o que indica que parte da vazão está passando pela válvula parcialmente aberta, será gerado uma nova **mensagem de falha de baixo fluxo de água de resfriamento**, até quando o operador fechar manualmente a VBM-UR em falha e passar todo o grupo para o modo manual local.
- Em caso de desvio de leitura de vazão nos FIR-12 e FIR-22 superior a 20% em relação ao valor de projeto, deverá ser gerada uma mensagem de alarme, para verificação em campo. Medidores de vazão com transmissores de diferencial de pressão acoplados em válvulas de balanceamento podem ter desvios de leituras em caso de variação da posição de abertura da válvula.
- Em caso de falha de leitura de vazão nos FIR-12 e FT-22, deverá ser gerada uma mensagem de

falha no medidor de vazão e as BACs operantes deverão operar com frequência máxima constante (60 Hz). Apesar da mensagem de falha, os *Chillers* em operação permanecerão em funcionamento, exceto se forem parados por falha de falta de fluxo.

4.12.4 CONTROLE DE VAZÃO DE ÁGUA GELADA DO CIRCUITO SECUNDÁRIO

O circuito secundário de água gelada terá vazão variável, em função da carga térmica do edifício, conforme a variação das válvulas de controle de vazão de água gelada nos condicionadores de ar.

O controle de frequência sobre os inversores das BAGSs do circuito secundário será realizado indiretamente pelo *setpoint* estabelecido no controlador de diferencial de pressão, com transmissor instalado em um ponto específico da tubulação principal do circuito secundário (diferencial entre alimentação e retorno), previamente definido no projeto hidráulico.

A definição do valor de *setpoint* deverá ser realizada após a execução do balanceamento hidrônico no circuito secundário, quando deverá ser registrado o diferencial de pressão do sensor de pressão diferencial da tubulação principal do circuito secundário – PDT-41 – na condição de máxima vazão do circuito secundário, com todas as válvulas de controle de vazão de água gelada dos condicionadores (válvulas de 2 Vias) nas suas aberturas máximas para o pico (simultâneo) de carga térmica do circuito secundário.

O valor verificado de pressão diferencial nesta condição será o *setpoint* adotado para o PDIC-40, que atua em cascata sobre o SIC-40 para o controle da frequência nos inversores e da vazão de água gelada no circuito. O valor a ser obtido no indicador deverá estar acima da metade da faixa de operação do sinal a ser enviado (ex. acima de 12 mA se o sinal enviado for de 4-20 mA).

Assim, o *setpoint* do PDIC-40 é que determinará o *setpoint* atual para o SIC-40 para o controle da frequência dos inversores dos motores das BAGSs.

A seguir, a lógica de funcionamento do controle de vazão de água gelada no circuito secundário, através da variação de frequência nas BAGSs:

- O funcionamento automático da 1ª BAGS será conforme a programação horária de funcionamento do circuito secundário, estabelecida pela equipe de operação.
- A sequência de partida das BAGSs, com rodízio programado, será definida pelo operador na tela do BMS.
- A 1ª BAGS deve entrar em operação com rotação mínima (a ser configurada nos painéis locais dos inversores de frequência).
- Caso o resumo de falha da 1ª BAGS estiver ativo (BAGS em falha), então será dado o comando de partida para a próxima BAGS da sequência que não estiver em falha.
- Com a 1ª BAGS em funcionamento, com o aumento de carga térmica, as válvulas de controle de vazão de água gelada dos condicionadores de ar se abrem. Com isso, o diferencial de pressão do transmissor PDT-41 tende a diminuir. Para manter o valor do *setpoint* no PDIC-40, um sinal analógico do controlador SIC-40 é enviado ao inversor de frequência da BAGS operante, de modo a aumentar a frequência do motor e a vazão total do circuito.
- Caso a 1ª BAGS operante atinja 60 Hz e o valor atual do sensor de pressão diferencial ainda esteja abaixo do *setpoint*, então, após um temporizador (127 s – valor configurável), será enviado um sinal para a entrada em funcionamento da 2ª BAGS (em sequência pré-estabelecida).
- Caso o resumo de falha da 2ª BAGS estiver ativo, (BAGS em falha), então será dado o comando de partida para a 3ª BAGS da sequência.
- Após a partida da 2ª BAGS (que deve iniciar o funcionamento com a frequência mínima), o controlador SIC-40 deverá enviar o **mesmo sinal** para os inversores de frequência das duas BAGSs em operação, para garantir que as bombas operem sempre com a mesma frequência.
- Com a diminuição da carga térmica do circuito secundário, ocorre o fechamento parcial das válvulas de controle de vazão de água gelada dos condicionadores de ar. Com isso, o diferencial de pressão do transmissor PDT-41 tende a aumentar. Para manter o valor do *setpoint* no PDIC-40, um sinal analógico do controlador SIC-40 é enviado ao inversor de frequência das BAGSs operantes, de modo a diminuir a frequência dos motores e a vazão total do circuito.

- Com duas bombas operando abaixo de 27 Hz, após um período a ser ajustado em um temporizador (127 s – valor configurável), então a 2ª BAGS deverá entrar em processo de parada (o que provocará a diminuição da frequência do seu inversor até o valor mínimo) e o controlador SIC-40 passará a enviar o sinal de controle apenas para a 1ª BAGS.
- Com a redução da frequência da 2ª BAGS e a sua parada, o diferencial de pressão do transmissor PDT-41 tenderá novamente diminuir e o controlador SIC-40 enviará um sinal para o aumento da frequência da BAGS operante.
- O comando de parada da 1ª BAGS será realizado pela programação horária estabelecida pela equipe de operação ou por meio de comando para desabilitar a operação das BAGSs pelo operador. Caso houver mais BAGSs em operação neste momento, as demais BAGSs também receberão o mesmo comando de parada.

CONDIÇÕES DE FALHA

- Com um determinado número de BAGSs em operação, em caso de falha em uma delas, como o sistema opera em barrilete, a próxima BAGS na sequência de partida (duas operantes e uma reserva) entrará automaticamente em operação, com a mesma rotina de entrada em operação e controle, conforme descrito anteriormente.
- Neste caso, será enviada uma mensagem de falha ao sistema de supervisão e a BAGS em falha só voltará a operar normalmente após sair da condição de falha, e será classificada como a 3 ªBAGS (reserva) na sequência de partida atual.
- Com a BAGS reserva em funcionamento, sua parada ocorrerá pela programação horária ou pelo rodízio programado pelo operador.
- Em caso de falha do transmissor PDT-41, o modo de operação automático do circuito secundário será desativado, e será necessário realizar toda operação de acionamento das BAGSs no modo de operação manual remoto. Será ainda enviada uma mensagem de falha geral do modo de operação automático do circuito secundário ao sistema de supervisão.
- Deve-se observar que em caso de falha no transmissor PDT-41, com a alteração para modo manual remoto do circuito secundário, o circuito primário deve continuar em operação normal no modo automático.

4.12.5 SEQUÊNCIA DE ENTRADA EM OPERAÇÃO DAS TORRES DE RESFRIAMENTO – MODO DE OPERAÇÃO AUTOMÁTICO

Os ventiladores das torres de resfriamento funcionarão de maneira independente da quantidade de *Chillers* em operação. Porém a sequência de entrada em operação das torres de resfriamento será vinculada à sequência de operação dos grupos de *Chillers*.

A lógica de comando de acionamento dos motores dos ventiladores será em função da temperatura de água de resfriamento na saída de cada torre, por meio dos controladores TICR-61 (VTR-01)/ TICR-62 (VTR-02)/ TICR-63 (VTR-03). Os controladores de temperatura (TICR) deverão atuar em cascata sobre os controladores dos inversores de frequência dos motores VTRs – SIC-61/ SIC-62/ SIC-63.

No descritivo os controladores da 1ª TR na sequência de partida serão identificados como TICR-1ªTR e SIC-1ªTR e assim, sucessivamente, para as demais torres.

O *setpoint* de controle da temperatura de saída de água das torres será variável, em função da temperatura de bulbo úmido do ar externo na entrada das torres indicada no TIR-81. O valor do SPAtual será conforme a seguinte equação:

$$SP_{Atual} = TI\text{-}81 + 4{,}5^{o}C, \text{ com } SP_{Atual} \geq 13{,}0\ ^{o}C \text{ (configurável).}$$

A sequência de entrada em operação das torres será vinculada à sequência de operação dos grupos de *Chillers* em função das válvulas de bloqueio automáticas nas tubulações de entrada de cada torre (VBM-TR). Assim, ao definir-se os componentes de cada grupo de *Chillers*, estará se definindo qual será a sequência de operação das torres (através da abertura das respectivas VBM-TR).

Visando a otimização do sistema, a quantidade de torres de resfriamento em funcionamento (incluindo a abertura da VBM-TR e o acionamento do

VTR) poderá ser maior que a quantidade de *Chillers* em funcionamento. Após estudo com o fabricante das torres de resfriamento, foi verificado que a vazão mínima de água em cada torre, neste caso, era de 40% da vazão de projeto. Portanto, será possível o funcionamento de duas torres com apenas um *Chiller* e de três torres com dois *Chillers*, porém, a quantidade máxima de torres operantes deve ser no máximo a N+1 da quantidade de *Chillers* operantes.

Neste conceito, a 3ªTR na sequência de partida não opera apenas como reserva.

A seguir, a lógica de funcionamento do controle de temperatura de água de resfriamento nos *Chillers*, por meio da partida/parada dos ventiladores das torres de resfriamento:

OPERAÇÃO DO 1º UR

- Com todos os *Chillers* desligados, os ventiladores das torres de resfriamento permanecerão desligados.
- Com um *Chiller* em operação, em qualquer um dos modos de operação da CAG, a 1ª VBM-TR estará aberta, conforme o comando do grupo de *Chillers* (ver item 4.12.2). Caso a temperatura no TICR-1ªTR ultrapassar a faixa de zona neutra do $\mathbf{SP_{Atual}}$, é acionado o comando de operação do 1º VTR e funcionará com controle automático da frequência do inversor do motor, conforme o controlador SIC-1ª TR, em função *setpoint* do controlador TICR-1ªTR. Deve-se salientar que a 1ª TR (1ª VBM-TR) foi previamente estabelecida em conjunto com o 1º Grupo de *Chillers*.
- Caso o resumo de falha da 1ª VBM-TR estiver ativo, (VBM-TR em falha) ou se o resumo de falha do 1º VTR estiver ativo, (torre em falha), então será dado o comando de partida para a 3ª TR da sequência, que inclui a abertura da 3ª VBM-TR com confirmação de posição e o acionamento do 3º VTR.
- É importante observar que neste caso, será necessária a abertura da 3ª VBM-TR, com confirmação de posição, antes da solicitação de fechamento da 1ª VBM-TR, para evitar falta de fluxo no *Chiller*.
- Com o 1º VTR em funcionamento e com apenas um *Chiller* em operação, caso a frequência do inversor atingir o valor máximo (ex. 60 Hz) e a temperatura no TICR-1ª TR estiver acima da faixa de zona neutra do $\mathbf{SP_{Atual}}$, após um período (ex. 127 s – valor configurável) é acionado o comando do 2º VTR na sequência de partida (indicado nos grupos de *Chillers*).
- Para a entrada em funcionamento do 2º VTR, será enviado um sinal simultâneo para a abertura da 2ª VBM-TR, com confirmação de posição. Deve-se observar que esta rotina pode ocorrer mesmo com apenas um *Chiller* em operação.
- Caso o resumo de falha da 2ª VBM-TR estiver ativo, (VBM-TR em falha) ou se o resumo de falha do 2º VTR estiver ativo, (torre em falha), então será dado o comando de partida para a 3ª TR da sequência, que inclui a abertura da 3ª VBM-TR com confirmação de posição e o acionamento do 3º VTR.
- Após a partida, o 2º VTR (que deve iniciar o funcionamento com frequência mínima) funcionará com controle automático da frequência do inversor do motor, com a ativação do controlador SIC-2ª TR, em função *setpoint* do controlador TICR-2ª TR. Deve-se salientar que a 2ª TR (2ª VBM-TR) foi previamente estabelecida em conjunto com o 2º Grupo de *Chillers*.
- Com apenas um *Chiller* em operação, caso os ventiladores das duas torres operantes atinjam 60 Hz e o valor atual dos respectivos TICRs ainda esteja acima da faixa de zona neutra do $\mathbf{SP_{Atual}}$, não será acionada a 3ª TR.
- Em caso de redução de carga, com um *Chiller* e duas torres em funcionamento, com os VTRs operando abaixo de 27 Hz, após um período a ser ajustado em um temporizador (ex. 127 s – valor configurável) será enviado um sinal de parada para o 2º VTR, que entrará em processo de parada (o que provocará a diminuição da frequência do seu inversor até o valor mínimo) e o controlador SIC-2ª TR será temporariamente desativado.
- Simultaneamente com o sinal de parada do 2º VTR será enviado um sinal para o fechamento da 2ª VBM-TR, com confirmação de posição.
- Com um *Chiller* e uma torre em operação, em caso de redução de carga, se mesmo com a frequência mínima no 1º VTR, a temperatura no TICR-1ª TR atingir o valor mínimo da faixa de zona neutra do $\mathbf{SP_{Atual}}$, após um período a ser ajustado em um temporizador (ex. 181 s – valor configurável), será enviado um sinal de parada para o 1º VTR.

- Neste caso, com o 1º UR ainda em funcionamento, a 1ª VBM-TR permanecerá aberta.
- Com um *Chiller* e uma torre em operação (VBM-TR aberta), com um novo aumento de carga térmica, e o aumento da temperatura do TICR-1ª TR, o 1º VTR entrará novamente em operação. Se a temperatura no TICR-1ª TR continuar elevada, a 2ª TR pode ser novamente acionada, conforme descrito anteriormente.

OPERAÇÃO DO 2º UR

- Com o sistema operando com apenas um *Chiller*, se for acionada a entrada em operação do 2º UR, em qualquer um dos modos de operação da CAG, será acionada a abertura da 2ª VBM-TR com confirmação de posição, conforme o comando do grupo de *Chillers*.
- Caso a 2ª VBM-TR já esteja aberta, com o 2º VTR em funcionamento (em conjunto com o 1º UR), inicialmente não será acionada a 3ª VBM-TR.
- Caso o resumo de falha da 2ª VBM-TR esteja ativo, (VBM-TR em falha) ou se o resumo de falha do 2º VTR esteja ativo, (torre em falha), então será solicitada a partida da 3ª TR da sequência, que inclui a abertura da 3ª VBM-TR com confirmação de posição e o acionamento do 3º VTR.
- É importante observar que, neste caso, é necessário primeiramente que a 3ª VBM-TR seja aberta, com confirmação de posição, antes da solicitação de fechamento da 2ª VBM-TR.
- Após a partida, o 2º VTR (que deve iniciar o funcionamento com frequência mínima) funcionará com controle automático da frequência do inversor do motor, com a ativação do controlador SIC-2ª TR, em função *setpoint* do controlador TICR-2ª TR.
- Com o 1º VTR e 2º VTR em funcionamento, e com dois *Chillers* em operação, caso a frequência dos inversores atinja o valor máximo (ex. 60 Hz) e a temperatura no TIR-05 (sensor instalado na tubulação de saída principal das torres para os *Chillers*) esteja acima da faixa de zona neutra do $\mathbf{SP_{Atual}}$, após um período (ex. 127 s – valor configurável) será acionado o comando do 3º VTR na sequência de partida (indicado nos grupos de *Chillers*).
- Para a entrada em funcionamento do 3º VTR, será enviado um sinal simultâneo para a abertura da 3ª VBM-TR, com confirmação de posição.
- Caso o resumo de falha da 3ª VBM-TR esteja ativo, (VBM-TR em falha) ou se o resumo de falha do 3º VTR esteja ativo, (torre em falha), então será cancelado o acionamento do 3º VTR e da 3ª VBM-TR e o sistema continuará operando com dois *Chillers* e duas torres de resfriamento.
- Após a partida, o 3º VTR (que deve iniciar o funcionamento com frequência mínima) funcionará com controle automático da frequência do inversor do motor, com a ativação do controlador SIC-3ª TR, em função *setpoint* do controlador TICR-3ª TR.
- Em caso de redução de carga, com dois *Chillers* e três torres em funcionamento, com os VTRs operando abaixo de 37 Hz, após um período a ser ajustado em um temporizador (ex. 127 s – valor configurável) será enviado um sinal de parada para o 3º VTR, que entrará em processo de parada (o que provocará a diminuição da frequência do seu inversor até o valor mínimo) e o controlador SIC-3ª TR será temporariamente desativado.
- Simultaneamente com o sinal de parada do 3º VTR será enviado um sinal para o fechamento da 3ª VBM-TR, com confirmação de posição.
- Com dois *Chillers* e três torres em funcionamento, caso ocorra a parada do 2º UR (por redução de carga ou por falha), será enviado um sinal de parada para o 3º VTR, que entrará em processo de desligamento (o que provocará a diminuição da frequência do seu inversor até o valor mínimo) e o controlador SIC-3ªTR será temporariamente desativado.
- Simultaneamente com o sinal de parada do 3º VTR será enviado um sinal para o fechamento da 3ª VBM-TR, com confirmação de posição.
- Com dois *Chillers* e duas torres em operação, em caso de redução de carga, se mesmo com a **frequência mínima** nos 1º VTR e 2º VTR, a temperatura no TICR-1ª TR **OU** TICR-2ª TR atingir o valor mínimo da faixa de zona neutra do $\mathbf{SP_{Atual}}$, após um período a ser ajustado em um temporizador (ex. 127 s – valor configurável) será enviado um sinal de parada para o respectivo VTR, que entrará em processo de parada e o respec-

tivo controlador dos inversores (SIC) será temporariamente desativado.

- Neste caso, com dois *Chillers* ainda em funcionamento, mesmo com um ou dois VTRs parados, as duas VBM-TRs permanecerão abertas.
- Com dois *Chillers* e duas torres em operação, com um novo aumento de carga térmica, e o aumento da temperatura no TICR-1ª TR **OU** TICR-2ª TR, o respectivo VTR entrará novamente em operação. Se os dois VTRs atingirem a máxima frequência e a temperatura no TIR-05 continuar elevada, a 3ª TR pode ser novamente acionada, conforme descrito anteriormente.

CONDIÇÕES DE FALHA

- Conforme descrito anteriormente, com **N** *Chillers* e **N** torres em operação (com **N**<3), em caso de falha de um VTR, o sistema deverá selecionar a 3ªTR na sequência de partida para operar substituindo a torre em falha.
- Neste caso deverá ser executada a rotina para garantir o fluxo de água de resfriamento nos *Chillers* em operação, respeitando rigorosamente a seguinte sequência de operações:
  - i) Abertura total (100%) da 3ªVBM-TR, com confirmação de posição;
  - ii) Acionamento do 3º VTR, com confirmação de funcionamento;
  - iii) Fechamento total (0%) da VBM-TR da torre em falha, com confirmação de posição.
- Conforme descrito anteriormente, com **um** *Chiller* e **duas** torres em operação, em caso de falha de um VTR, será solicitado o fechamento da respectiva VBM-TR, com confirmação de posição.
- Neste caso, se a temperatura no TICR-1ª TR voltar a subir acima da zona neutra do $\mathbf{SP_{Atual}}$, após um período (ex. 127 s – valor configurável) será solicitado a partida do 3º VTR na sequência de partida e a abertura da 3ª VBM-TR.
- Caso a temperatura de saída de água de resfriamento de alguma das bacias das torres em operação (TICR-61/TICR-62/TICR-63) esteja 2,3 ºC (valor configurável) acima da faixa superior da zona neutra do valor de *setpoint* dos controladores (*approach* na torre de resfriamento superior a 6,3 ºC), com o respectivo VTR operando na frequência máxima (ex.: 60 Hz), após um período a ser ajustado em um temporizador (ex. 307 s – valor configurável), será gerada uma mensagem de alarme de alta temperatura (ex: TAH-61 para a TR-01) e caberá ao operador analisar as condições de operação das torres de resfriamento (em função do *approach* de temperatura na bacia da torre monitorado em gráfico de tendências – ver item 4.12.7) e decidir pela parada para manutenção da torre deficiente.
- Independente da quantidade de torres e *Chillers* operantes, se o valor atual da temperatura de saída de água de resfriamento de alguma das bacias das torres operantes (TICR-61/TICR-62/TICR-63) ultrapassar a temperatura máxima de operação (estabelecida em 31 ºC – configurável – a ser definida com o fabricante dos *Chillers*), uma mensagem de falha de temperatura crítica será gerada (ex: TAHH-61 para a TR-01) e a respectiva torre será desabilitada (em Falha), com a parada do ventilador e o fechamento da respectiva VBM-TR.
- Neste caso, a habilitação da próxima torre será de acordo com as rotinas de falhas e sequência de operações da torre reserva, conforme descritas anteriormente.
- Em caso de falha em algum dos sensores das torres (TE-61/TE-62/TE-63), será ativado o controlador TICR-05 (na tubulação de saída geral das torres) para controlar o SIC da torre com o sensor em falha.
- Em caso de falha em algum dos sensores das torres (TE-61/TE-62/TE-63) e falha no sensor TE-05, o modo de operação automático da respectiva torre será desativado e será necessário realizar toda operação de acionamento do seu VTR em modo manual remoto. Será ainda enviada uma mensagem de falha de modo automático daquele VTR ao sistema de supervisão.

4.12.6 MONITORAÇÃO DA CAPACIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA DE ÁGUA GELADA

Para a monitoração de capacidade e eficiência energética dos *Chillers* e o sistema de água gelada,

será necessária a monitoração da seguinte instrumentação de campo:

- FI-11 – Vazão de Água Gelada – UR-01.
- FI-21 – Vazão de Água Gelada – UR-02.
- TIR-02 – Temperatura de Entrada de Água Gelada nos *Chillers* (Circuito Primário).
- TIR-11 – Temperatura de Saída de Água Gelada – UR-01.
- TIR-21 – Temperatura de Saída de Água Gelada – UR-02.
- JIR-11 – Potência Ativa no UR-01.
- JIR-21 – Potência Ativa no UR-02.
- JIR-31 – Potência Ativa Total das Bombas Primárias.
- JIR-41 – Potência Ativa Total das Bombas Secundárias.
- JIR-51 – Potência Ativa Total das Bombas de Resfriamento.
- JIR-61 – Potência Ativa Total dos Ventiladores das torres de Resfriamento.
- Para todos os *Chillers*, os cálculos de capacidade e de eficiência energética só estarão ativos para os *Chillers* em funcionamento. Com o *Chiller* parado, a capacidade terá um valor 0 (zero) e o COP não terá nenhum valor exibido (apenas o sinal "–").

CAPACIDADE E COP – UR-01

Com a monitoração das temperaturas de entrada (TI-02) e saída (TI-11) de água gelada e da vazão de água gelada no UR-01 (FI-11), será possível obter a capacidade atual do UR-01 (CIR-11). A seguir, a equação de cálculo da capacidade atual do UR-01:

$$\textbf{CIR-11}_{\textbf{Atual}} =$$

$$\textbf{FI-11 (m}^3\textbf{/h) x (TI-02 – TI-11) (°C) / 0,86 (kW)}$$

Com a monitoração da potência absorvida (JIR-11) no UR-01 – obtida do painel elétrico do UR-01 – e da capacidade atual (CIR-11) do UR-01, será possível obter a eficiência energética atual (MIR-11) do UR-01, quando em operação. A seguir, a equação de cálculo da eficiência energética (COP) do UR-01:

$$\textbf{COP = MIR-11}_{\textbf{Atual}} =$$

$$\textbf{CIR-11}_{\textbf{Atual}}\textbf{ (kW) / JIR-11}_{\textbf{Atual}}\textbf{ (kW) (kW/kW)}$$

CAPACIDADE E COP – UR-02

Com a monitoração das temperaturas de entrada (TI-02) e saída (TI-21) de água gelada e da vazão de água gelada no UR-02 (FI-21), será possível obter a capacidade atual do UR-02 (CIR-21). A seguir, a equação de cálculo da capacidade atual do UR-02:

$$\textbf{CIR-11}_{\textbf{Atual}} =$$

$$\textbf{FI-21 (m}^3\textbf{/h) x (TI-02 – TI-21) (°C) / 0,86 (kW)}$$

Com a monitoração da potência absorvida (JIR-21) no UR-02 – obtida do painel elétrico do UR-02 – e da capacidade atual (CIR-21) do UR-02, será possível obter a eficiência energética atual (MIR-21) do UR-02, quando em operação. A seguir, a equação de cálculo da eficiência energética (COP) do UR-02:

$$\textbf{COP = MIR-21}_{\textbf{Atual}} =$$

$$\textbf{CIR-21}_{\textbf{Atual}}\textbf{ (kW) / JIR-21}_{\textbf{Atual}}\textbf{ (kW) (kW/kW)}$$

CAPACIDADE E COP – SISTEMA DE ÁGUA GELADA

A capacidade total do sistema de água gelada será obtida pela somatória das capacidades dos *Chillers* em operação. A seguir, a equação de cálculo da capacidade atual do sistema de água gelada:

$$\textbf{CIR-100}_{\textbf{Atual}}\textbf{ = CIR-11 + CIR-21 (kW)}$$

A potência total absorvida dos *Chillers* será obtida pela somatória das potências absorvidas dos *Chillers* em operação. A seguir, a equação de cálculo da potência total absorvida dos *Chillers*:

$$\textbf{JIR-10}_{\textbf{Atual}}\textbf{ = JIR-11 + JIR-21 (kW)}$$

Com a monitoração da potência total absorvida nos *Chillers* (JIR-10) e da potência total absorvida dos painéis elétricos das bombas e ventiladores das torres de resfriamento, será possível obter a potência total absorvida do sistema de água gelada (JIR-100). A seguir, a equação de cálculo da potência total absorvida do sistema de água gelada:

$$\mathbf{JIR\text{-}100_{Atual} =}$$

$$\mathbf{JIR\text{-}10 + JIR\text{-}31 + JIR\text{-}41 + JIR\text{-}51 + JIR\text{-}61\ (kW)}$$

A seguir, a equação de cálculo da eficiência energética do sistema de água gelada:

$$\mathbf{COP = MIR\text{-}100_{Atual} =}$$

$$\mathbf{CIR\text{-}100_{Atual}\ (kW) / JIR\text{-}100_{Atual}\ (kW)\ (kW/kW)}$$

4.12.7 MONITORAÇÃO DE DADOS OPERACIONAIS E GRÁFICOS DE TENDÊNCIAS

Finalmente, deverão estar disponíveis gráficos de tendência (*trends*) em função do tempo das seguintes variáveis:

- CIR-100 – Capacidade Total do Sistema de Água Gelada (kW ou ton).
- JIR-10 – Potência Instantânea Total Absorvida pelos *Chillers* (kW).
- JIR-100 – Potência Instantânea Total Absorvida no Sistema de Água Gelada (kW).
- MIR-100 – COP do Sistema de Água Gelada (kW/kW ou kW/ton).
- TIR-01 – Temperatura de Saída de Água Gelada nos *Chillers* (Circuito Primário).
- TIR-02 – Temperatura de Entrada de Água Gelada nos *Chillers* (Circuito Primário).
- TIR-11 – Temperatura de Saída de Água Gelada – UR-01.
- TIR-21 – Temperatura de Saída de Água Gelada – UR-02.
- TIR-03 – Temperatura de Alimentação de Água Gelada para o Circuito Secundário.
- TIR-04 – Temperatura de Retorno de Água Gelada do Circuito Secundário.
- FIR-01 – Vazão Total de Água Gelada no Circuito Secundário.
- TIR-05 – Temperatura de Entrada (Geral) das Torres de Resfriamento.
- TIR-06 – Temperatura de Saída (Geral) torres de Resfriamento.
- TIR-61 – Temperatura de Saída de Água de Resfriamento – TR-01.
- TIR-62 – Temperatura de Saída de Água de Resfriamento – TR-02.
- TIR-63 – Temperatura de Saída de Água de Resfriamento – TR-03.
- (TIR-61 - TIR-81) – *approach* na Bacia – TR-01.
- (TIR-62 - TIR-81) – *approach* na Bacia – TR-02.
- (TIR-63 - TIR-81) – *approach* na Bacia – TR-03.
- CIR-11 – Capacidade – UR-01.
- CIR-21 – Capacidade – UR-02.
- CIR-101 – Capacidade – Circuito Secundário.
- MIR-11 – COP – UR-01.
- MIR-21 – COP – UR-02.
- JIR-11 – Potência Ativa no UR-01.
- JIR-21 – Potência Ativa no UR-02.
- JIR-31 – Potência Ativa Total das Bombas Primárias.
- JIR-41 – Potência Ativa Total das Bombas Secundárias.
- JIR-51 – Potência Ativa Total das Bombas de Resfriamento.
- JIR-61 – Potência Ativa Total das Torres de Resfriamento.
- FI-101 – Vazão de Água Gelada – Circuito Secundário.
- TIR-81 – Temperatura de Bulbo Seco do Ar Externo (ºC).
- TIR-83 – Temperatura de Bulbo Úmido do Ar Externo (ºC).
- MIR-81 – Umidade Relativa do Ar Externo (%UR).

4.13 LÓGICAS DE CONTROLE – SISTEMA DE ÁGUA GELADA DE CIRCUITO ÚNICO COM RAZÃO VARIÁVEL

Nos itens 4.13.2 a 4.13.5 é apresentado um exemplo do descritivo das lógicas de controle de um sistema real, com circuito único com vazão de água gelada variável, com as seguintes características:

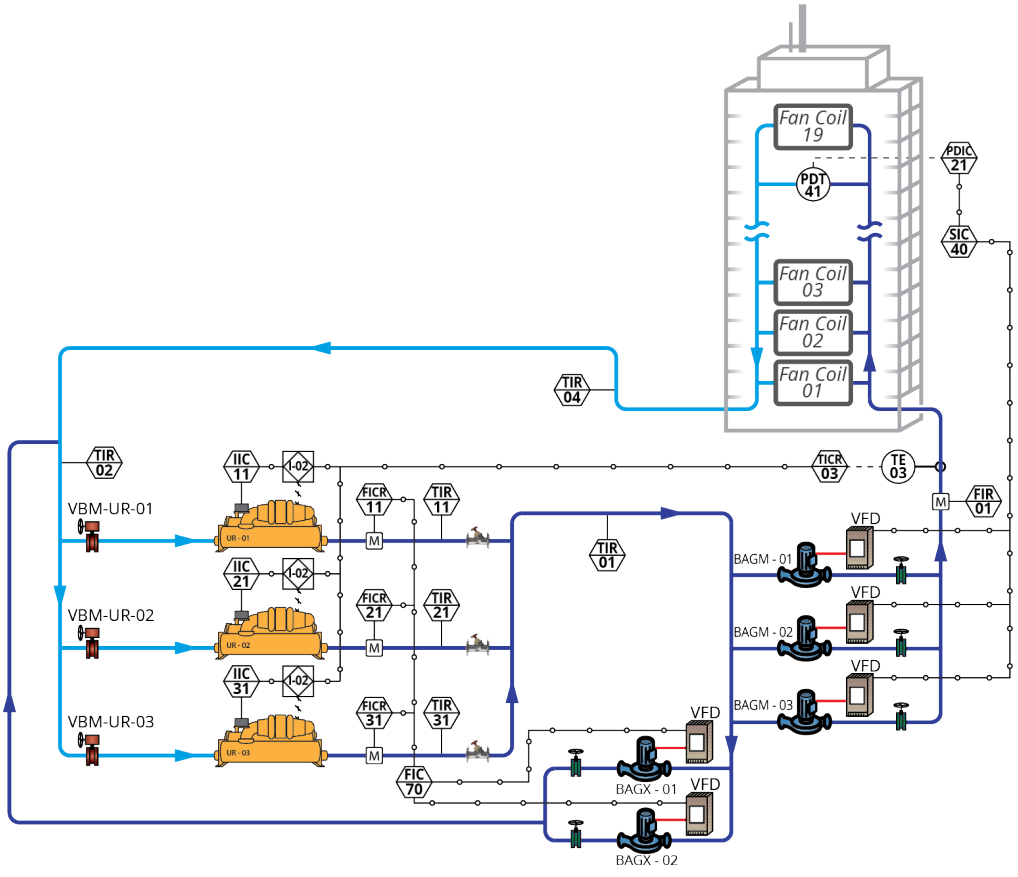
- 3 URs – *Chillers* com Condensação a Água dois operantes e um reserva;
- 3 BAGMs – Bombas de Água Gelada do Circuito Principal, duas operantes e uma reserva;
- 2 BAGXs – Bombas de Água Gelada Auxiliares, para garantir a vazão mínima nos *Chillers* em operação, uma operante e uma reserva;
- 3 BACs – Bombas de água de resfriamento, com recalque para um barrilete comum (qualquer BAC atende qualquer *Chiller*), com uma bomba reserva;
- 3 TRs – Torres de Resfriamento e seus Ventiladores (VTRs), com a possibilidade de operar as três torres simultaneamente;
- 3 VBM-URs – Válvulas de Bloqueio Motorizadas, na tubulação de entrada de água gelada de cada *Chiller*;
- 3 VBM-TRs – Válvulas de Bloqueio Motorizadas, na tubulação de entrada de água de resfriamento de cada torre.

Neste exemplo serão apresentadas apenas as lógicas do circuito de água gelada para mostrar as características específicas de um circuito único com vazão variável de água gelada. As lógicas para o circuito de água de resfriamento são praticamente as mesmas do item 4.12, exceto que o sistema possui um terceiro *Chiller* reserva.

4.13.1 FLUXOGRAMAS DE ENGENHARIA DO SISTEMA DE ÁGUA GELADA

A Figura 40 apresenta o fluxograma esquemático do circuito de água gelada do sistema utilizado para este exemplo, com os principais equipamentos e elementos de controle do sistema, utilizando a simbologia do ***ISA Standard 5.1*** de maneira simplificada, para fins ilustrativos do descritivo das lógicas apresentadas.

Figura 40 – Fluxograma de engenharia esquemático da CAG – Circuito único de água gelada



Fonte: Elaboração do autor.

4.13.2 SEQUÊNCIA DE ENTRADA EM OPERAÇÃO DOS *CHILLERS* – MODO DE OPERAÇÃO AUTOMÁTICO

No modo de operação automático, todo sistema opera sobre o controle da automação.

REQUISITOS PRELIMINARES PARA A OPERAÇÃO DO SISTEMA

Deverá ser estabelecida uma sequência de partida dos **grupos dos *Chillers*** (URs) com os seguintes componentes:

- 1 UR;
- 1 BAGX (operante ou reserva);
- 1 BAC (qualquer – em função da sequência de partida ou BAC reserva);
- 1 VBM-UR-AG na tubulação de entrada de água gelada do *Chiller* em funcionamento;
- 1 VBM-UR na tubulação de entrada de água de resfriamento do *Chiller* em funcionamento;
- 1 VBM-TR na tubulação de entrada de água de resfriamento da torre em funcionamento (definida pela sequência de partida dos grupos das torres).

Deverá ser estabelecida uma sequência de partida dos **grupos das torres de resfriamento** com os seguintes componentes:

- 1 TR e seu ventilador (VTR);
- 1 VBM-TR na tubulação de entrada de água de resfriamento da torre em funcionamento.

FUNCIONALIDADE DO SISTEMA

- A BAGX é uma bomba auxiliar (comum a todos os *Chillers*) e funciona apenas por alguns minutos a partir da solicitação de partida do próximo grupo de *Chillers*. Para a partida do 1º Grupo não é necessário o funcionamento da BAGX.
- As BACs não são dedicadas aos *Chillers* (arranjo em barrilete). Portanto, qualquer BAC pode operar com qualquer *Chiller* e dependem apenas da sequência de partida das BACs previamente definida, para operação conjunta com a atual sequência de partida dos *Chillers*. A última BAC na sequência de partida atual será definida como BAC reserva e em caso de falha de alguma BAC, a BAC reserva entrará em operação.
- Cada *Chiller* possui uma **VBM-UR-AG**, dedicada ao circuito de **água gelada** e uma **VBM-UR-AC** dedicada ao circuito de **água de resfriamento**.
- Cada torre de resfriamento possui uma VBM-TR dedicada. Os VTRs (ventiladores da torre) só entrarão em funcionamento quando houver fluxo de água de resfriamento pela respectiva torre (VBM-TR aberta).
- As VBM-TRs não são dedicadas aos *Chillers* (ex. VBM-TR-01 com UR-01), mas, para que um *Chiller* entre em funcionamento, é necessário que haja pelo menos uma VBM-TR aberta. Para "N" *Chillers* em funcionamento, é necessário que haja pelo menos "N" VBM-TRs abertas. A sequência de abertura das VBM-TRs é definida pela sequência dos grupos de torres.
- A sequência de partida dos grupos dos *Chillers* e das torres de Resfriamento será estabelecida pelo operador.
- O controlador TICR-03 (do sensor TE-03) em conjunto com os controladores de corrente dos *Chillers* em operação (IIC-11/IIC-21/IIC-31) atuam sobre os comandos de partida e parada dos grupos de *Chillers*.
- O controlador PDIC-40 (do sensor PDT-41) atua sobre o controlador SIC-40 para o controle de frequência dos inversores das BAGMs em operação, de modo a manter o *setpoint* de pressão diferencial no PDT-41.
- O controlador FIC-50 (dos medidores de vazão FIR-12/FIR-22/FIR-32) atua sobre o controlador SIC-50 para o controle dos inversores das BACs em operação de modo a manter o *setpoint* de vazão de água de resfriamento nos *Chillers*.
- Os controladores TICR-61/TICR-62 e TICR-63 atuam respectivamente sobre os controladores SIC-61/SIC-62/SIC-63 para o controle dos inversores dos VTRs em operação de modo a manter o *setpoint* de temperatura de água de resfriamento na saída das torres de resfriamento.
- O controlador FIC-70 (dos medidores de vazão FIR-11/FIR-21/FIR-31) atua sobre o controlador

SIC-70 para o controle dos inversores das BAGXs em operação de modo a manter o *setpoint* de vazão mínima de água gelada nos *Chillers*.

INÍCIO DE OPERAÇÃO

- A partir de um sinal de liberação de operação da CAG e/ou por meio de programação horária haverá a solicitação de operação dos seguintes componentes:
  - Abertura da VBM-UR-AG dedicada ao 1º UR da sequência de partida;
  - 1ª BAGM da sequência de partida do circuito principal de água gelada.

OPERAÇÃO DO 1º UR

- Com a 1ª BAGM do circuito principal em funcionamento e a 1ª VBM-UR-AG aberta (com confirmação de posição de abertura total), haverá o aumento de temperatura da água gelada indicada no sensor TE-03 (com *setpoint* de projeto no TICR-03 de 6,0 ºC e faixa de zona neutra de +/- 0,5 ºC). Será então iniciado o processo de partida do 1º UR.
- Caso o resumo de falha do 1º UR esteja ativo (*Chiller* em falha), então será alterada a sequência de partida atual e o 2º UR na sequência atual passará a ser o 1º UR. Neste caso será solicitada a abertura da VBM-UR-AG dedicada ao 2º UR e, após a sua confirmação de posição de abertura total, solicitado o fechamento da VBM-UR-AG dedicada ao 1º UR.
- Para o 1º UR é necessário que todos os elementos do 1º Grupo (auxiliares à sua operação) estejam em funcionamento ou na posição solicitada para que o 1º UR possa funcionar.
- Portanto, após liberada a solicitação de partida do 1º UR, serão acionados os elementos do 1º Grupo, rigorosamente na seguinte sequência:
  - i) Abertura da VBM-UR-AG dedicada ao 1º UR, com confirmação de posição (já aberta);
  - ii) Partida da 1ª BAC, conforme a sequência de partida, com confirmação de funcionamento;
  - iii) Abertura total (100%) da VBM-UR-AC dedicada ao 1º UR, com confirmação de posição e (simultaneamente) a abertura da 1ª VBM-TR, conforme a sequência de partida, com confirmação de posição.
- Com a confirmação dos indicadores acima, será liberado o sinal de partida do 1º UR. Caso esteja pronto para partir, com as proteções elétricas liberadas (ex. sensor de fluxo de água gelada/água de resfriamento, por meio painel de controle do *Chiller*), o 1º UR entrará em operação, com confirmação de funcionamento.
- Com o 1º UR em funcionamento, a capacidade do mesmo modula em função do *setpoint* da temperatura de saída de água gelada estabelecido no painel de controle do 1ºUR, conforme a necessidade de carga térmica do edifício.

OPERAÇÃO DO 2º UR

- Com um *Chiller* em operação, caso haja um aumento de capacidade no sistema e for necessária a operação do próximo *Chiller*, deverão ser verificadas as seguintes condições:
  - Se o 1º UR atingir **97% de carga** (% FLA – valor configurável, a ser verificado através do módulo de comunicação de dados entre o *Chiller* e o sistema de automação) e se a temperatura de água gelada no TICR-03 estiver **acima do** *setpoint* (>6,0 ºC), inicia-se o processo de entrada em operação do 2º UR com a ativação de um temporizador (181 s – valor configurável).
  - Se o 1º UR atingir **89% de carga** (% FLA – valor configurável, a ser verificado através do módulo de comunicação de dados entre o *Chiller* e o sistema de automação) e se a temperatura de água gelada no TE-01 estiver **acima** do valor superior da faixa de zona neutra do *setpoint* (>6,5 ºC), inicia-se o processo de entrada em operação do 2º UR com a ativação de um temporizador (307 s – valor configurável);
  - Independente da carga atual do 1º UR se a temperatura de água gelada no TICR-03 estiver 1,7 ºC (valor configurável) **acima do** *setpoint* (>7,7 ºC) inicia-se o processo de entrada em operação do 2º UR com a ativação de um temporizador (1.201 s – valor configurável);
- Ao final da contagem de cada temporizador, se uma das condições acima se mantiver será

enviado um sinal de solicitação de partida do 2º UR.

- O sinal de solicitação de partida será por pulso, ou seja, após o envio do sinal de solicitação de partida do 2º UR, a lógica de verificação de carga do 1º UR (com as condições acima) deve ser desativada. Esta lógica de verificação só será ativada novamente quando apenas o 1º UR estiver em operação.
- Caso o resumo de falha do 2º UR estiver ativo (*Chiller* em falha), então será mantida a sequência de partida atual e será acionada a solicitação de partida do 3º UR (3º Grupo).
- Após liberada a solicitação de partida do 2º UR, serão acionados os elementos do 2º Grupo, rigorosamente na seguinte sequência:
  - i) Partida da BAGX operante, com frequência fixa de 47 Hz (valor configurável), com confirmação de funcionamento;
  - ii) Abertura total (100%) da VBM-UR-AG dedicada ao 2º UR, com confirmação de posição;
  - iii) Partida da 2ª BAC, conforme a sequência de partida, com confirmação de funcionamento;
  - vi) Abertura total (100%) da VBM-UR-AC dedicada ao 2º UR, com confirmação de posição e (simultaneamente) a abertura total (100%) da 2ª VBM-TR, com confirmação de posição. Caso a 2ª VBM-TR já esteja aberta (se o 1º UR estiver operando com duas torres), não será necessário inicialmente solicitar a abertura da 3ª VBM-TR.
- Com a confirmação dos indicadores acima, será liberado o sinal de partida do 2º UR. Caso esteja pronto para partir, com as proteções elétricas liberadas (ex. sensor de fluxo de água gelada/água de resfriamento, por meio do painel de controle do *Chiller*), o 2º UR entrará em operação, com confirmação de funcionamento.
- A BAGX tem função apenas de garantir a vazão mínima nos *Chillers* e evitar grandes oscilações de vazão nos *Chillers* durante o processo de abertura da 2ª VBM-UR-AG e entrada em operação do 2º UR. O modo de controle de funcionamento da BAGX está descrito no item 4.13.3.
- Com os dois *Chillers* em funcionamento, estes operam modulando a capacidade, em função do *setpoint* da temperatura de saída de água gelada estabelecido no painel de controle de cada UR, conforme a carga térmica atual do edifício.
- O sistema atual prevê a operação de apenas dois *Chillers*. Assim, o 3º UR na sequência de partida deverá funcionar apenas como equipamento reserva.

PARADA DO 2º UR

- Com dois *Chillers* em funcionamento, caso a carga térmica venha a diminuir de modo que **a somatória** das porcentagens de corrente nos *Chillers* (% FLA) seja menor que 95% (valor configurável) e a temperatura no TICR-03 estiver menor que o limite superior da zona neutra (< 6,5 ºC) será ativado um temporizador (181 s – valor configurável).
- Se ao final da contagem do temporizador, a somatória da %FLA continue baixa, então será solicitada a parada do 2º UR e em seguida, a partir da confirmação de parada do 2º UR, os elementos do 2º Grupo também serão parados.
- Com a parada do 2º UR, então, a seguinte sequência de operação deverá ser rigorosamente seguida para a parada dos demais equipamentos do 2º Grupo:
  - i) Fechamento total (0%) da VBM-UR-AG dedicada ao 2º UR, com confirmação de posição;
  - ii) Fechamento total (0%) da VBM-UR-AC dedicada ao 2º UR, com confirmação de posição;
  - iii) Parada da 2ª BAC, conforme a sequência de partida, com confirmação de parada;
  - iv) A 2ª VBM-TR inicialmente será mantida aberta e o seu fechamento será em função da lógica de controle dos VTRs.

PARADA DO 1º UR

- A **solicitação de parada** do 1º Grupo será realizada apenas pela programação horária ou através de comando do operador para desabilitar a operação de toda a CAG, incluindo as BAGMs do circuito de água gelada principal.
- Com a solicitação de parada da CAG, a partir da confirmação de parada do 1º UR, as BAGMs e os elementos do circuito de água de resfriamento também serão parados, conforme a seguir:

i) Fechamento total (0%) da VBM-UR-AC dedicada ao 1º UR, com confirmação de posição;

ii) Parada da 1ª BAC, conforme a sequência de partida, com confirmação de parada;

iii) Parada da 1ª BAGM, conforme a sequência de partida, com confirmação de parada.

- Com a parada de todas as BACs, será solicitada a parada de todos os eventuais grupos de torres em funcionamento, como a parada dos VTRs em funcionamento (com confirmação de parada) e o fechamento total (0%) das VBM-TRs que estiverem abertas (com confirmação posição).
- Com a confirmação de parada da 1ª BAGM, será solicitado o fechamento total (0%) da VBM-UR-AG dedicada ao 1º UR, com confirmação de posição.
- Se o sistema estiver operando com **baixa carga térmica** (dentro do horário normal de funcionamento e com o **1º Grupo habilitado**), de tal modo que o 1º UR seja parado por baixa capacidade (não por falha), será solicitada a parada apenas da 1ª BAC, o fechamento da VBM-UR-AC dedicada ao 1º UR e o fechamento das VBM-TRs que estiverem abertas.
- A VBM-UR-AG dedicada ao 1º UR permanecerá aberta normalmente, em conjunto com a 1ª BAGM operante.
- Nesta condição, caso a temperatura no TICR-03 aumentar novamente, será solicitada novamente a operação do 1º UR (e respectivos elementos do 1º Grupo), que só entrará novamente em operação quando cumpridas as condições internas do painel de controle do *Chiller* (ex. temporizador anticiclagem do motor) para nova partida. Como não se trata de Falha no 1º UR, não se deve solicitar a partida do 2º UR, nem alterar a sequência de partida dos grupos.

CONDIÇÕES DE FALHA

- Com dois *Chillers* em funcionamento, havendo uma condição de falha em um elemento **dedicado** a um determinado *Chiller* (UR/VBM-UR-AG/ VBM-UR-AC), e o respectivo *Chiller* parar, então este grupo deverá ser imediatamente classificado como 2º Grupo e será executada a sequência de parada dos demais elementos, conforme a **sequência de parada do 2º UR**.
- O acionamento do próximo grupo na sequência de partida será em função do aumento de carga do *Chiller* operante.
- Com um *Chiller* em funcionamento, havendo uma condição de falha em qualquer elemento **dedicado** ao *Chiller* (UR/ VBM-UR-AG/ VBM-UR-AC), e o respectivo *Chiller* parar, então será executada a sequência de parada dos demais elementos, conforme a **sequência de parada do 1º UR**.
- O acionamento do próximo grupo na sequência de partida será em função do aumento de temperatura no TICR-03.
- Em caso de falha por vazão crítica (mínima) em um ou mais *Chillers* em operação, será acionado um temporizador (ex 307 s – valor configurável). Se após este tempo, a falha ainda estiver ativa, será solicitada a parada do último UR da sequência de partida que está em funcionamento.
- Se após a parada do último UR e o fechamento da respectiva VBM-UR-AG, algum elemento de falha ainda esteja ativo, será solicitada a parada do último UR da sequência de partida que está em funcionamento.
- Dependendo da oscilação da vazão de água gelada, um ou mais *Chillers* poderão parar por falha de falta de fluxo de água gelada (parada normal por proteção interna do equipamento).
- Neste projeto, o valor de vazão mínima de água gelada permitida (estabelecido pelo fabricante dos *Chillers*) foi de 135 m³/h. O *setpoint* de **Falha** por vazão crítica dos *Chillers* será de 149 m³/h.
- Em caso de falha de BAC, é importante observar que, como o sistema opera em barrilete, a BAC reserva poderá entrar automaticamente em operação antes de ocorrer alguma falha no *Chiller*. Portanto, em caso de falha em BAC, se com a entrada da BAC reserva, o *Chiller* continuar operando, não haverá a sequência de parada do grupo.
- Neste caso, será enviada uma mensagem de falha ao sistema de supervisão e a BAC em falha só voltará a operar normalmente após sair da condição de falha e apenas após a parada do respectivo grupo, quando for solicitada nova partida deste. Enquanto isso, este grupo segue operando com a BAC reserva.
- Em caso de falha de abertura ou fechamento de uma VBM-UR-AG, o respectivo UR deverá parar

por falha. **A equipe de manutenção deve ser imediatamente acionada para verificação em campo**. Caso a válvula esteja parcialmente ou totalmente aberta, ela deverá ser fechada manualmente (ou outra válvula de bloqueio manual) para cessar o fluxo de água não resfriada pelo UR parado.

- Caso o problema não seja de resolução imediata, recomenda-se a operação em modo manual local do grupo, com os procedimentos de partida ou parada do grupo em função da sequência de partida ou parada do mesmo.
- Em caso de falha de abertura ou fechamento de uma VBM-UR-AC, o respectivo UR deverá parar por falha. A continuidade em operação da BAC do respectivo grupo dependerá do controle de vazão de água de resfriamento nos demais *Chillers* em operação.
- Caso o problema não seja de resolução imediata, recomenda-se a operação em modo manual local do grupo, com os procedimentos de partida ou parada do grupo em função da sequência de partida ou parada do mesmo.
- Como alternativa, pode-se optar pela abertura total desta válvula em modo manual (no campo). Neste caso, será ainda necessária a operação em **modo forçado** de pelo menos uma BAC e uma VBM-TR assim que for liberada a CAG pela programação horária.
- Com **apenas o 1º UR** em funcionamento, **se apenas a 1ª VBM-TR** estiver aberta, em caso de falha de abertura da válvula que force o seu fechamento, então será alterada a sequência de partida dos grupos das torres e a VBM-TR em falha será definida como a **3ª VBM-TR**. Imediatamente será solicitada a abertura da nova 1ª VBM-TR. Caso, durante a transição, o 1º UR parar por falha de falta de fluxo, será considerada a falha, então será mantida a sequência de partida atual e será acionada a solicitação de partida do 2º UR (2º Grupo).
- Se duas ou mais VBM-TRs estiverem abertas, em caso de falha de abertura de uma das válvulas que force o seu fechamento, deverá ser acionada a abertura da próxima VBM-TR. Neste caso, não deve haver parada dos *Chillers* em funcionamento.
- Quando uma VBM-TR entrar em falha, o VTR da respectiva torre de resfriamento será desabilitado para operar em modo automático. Neste caso, será necessário que o operador realize a abertura manual da VBM-TR da respectiva célula e após indicar posição de abertura forçada da válvula (na tela do BMS), o VTR da respectiva torre poderá ser novamente liberado para operar em modo automático.
- Em caso de falha por nível crítico no tanque de equalização das bacias das torres de resfriamento, todas as BACs serão desligadas por nível mínimo, assim como todos os grupos de *Chillers*. Será ainda enviada uma mensagem de falha geral ao sistema de supervisão. Deve-se observar que esta é uma condição crítica de emergência, portanto, será acionado um alarme sonoro de aviso à sala de controle e à sala de manutenção.
- Em caso de falha por nível crítico no tanque de expansão do circuito de água gelada, todas as BAGMs e BAGXs serão desligadas por nível mínimo, assim como todos os grupos dos *Chillers*. Deve-se observar que esta é uma condição crítica de emergência, portanto, será acionado um alarme sonoro de aviso à sala de controle e à sala de manutenção.
- Em caso de falha no sensor TE-03, o modo de operação Automático será desativado, e será necessário realizar toda operação de acionamento dos *Chillers* no modo manual remoto. Será ainda enviada uma mensagem de falha geral do modo automático dos *Chillers* ao sistema de supervisão.

4.13.3 CONTROLE DE VAZÃO MÍNIMA DE ÁGUA GELADA NOS *CHILLERS*

Com o sistema operando em circuito único com vazão de água gelada variável em função da carga térmica total atual, ocorrerão condições em que a vazão total de água gelada poderá ser menor que a vazão mínima requerida no(s) *Chiller*(s) operante(s). Nestas condições, em função do *setpoint* de **Alarme** de vazão mínima, será acionada a bomba de água gelada auxiliar – BAGX (uma operante e uma reserva) que funcionará com vazão variável e será controlada pelo *setpoint* de **Controle** de vazão mínima indicado nos medidores de vazão de água gelada dos *Chillers* em operação. A seguir, as rotinas para o funcionamento da BAGX:

CONDIÇÃO 1 – VAZÃO MÍNIMA

- Com N *Chillers* em operação em carga parcial, o acionamento da BAGX e sua permanência em operação será em função do *setpoint* de **Alarme** de vazão mínima requerida em cada *Chiller*, com valor fixo de FAL-11= FAL-21= FAL-31= 167 m³/h:
- Se algum *Chiller* em funcionamento atingir o *setpoint* de **Alarme** (FAL-x1), o controlador de vazão FIC-x1 do respectivo *Chiller* envia um sinal proporcional para o controlador SIC-70, que atua sobre o inversor de frequência para acionamento da BAGX operante e promove a variação complementar de vazão de água gelada no(s) *Chiller*(s) operante(s) para o valor de *setpoint* de **Controle** para a BAGX com valor fixo de $\mathbf{V_{SP\text{-}FIC\text{-}x1}}$ = 179 m³/h.
- Neste período, a BAGM operante do circuito principal continua sendo controlada pelo PDIC-40. Com o aumento da carga térmica e da vazão em cada um dos *Chillers* operantes, acima do *setpoint* de **Alarme** (FAL-x1), caso a BAGX atinja o seu valor mínimo e permaneça assim por um período (19 Hz durante 349 s – valores configuráveis pelo BMS), então a BAGX será desligada e o sistema volta a operar apenas com a vazão total das BAGMs.

CONDIÇÃO 2 – ENTRADA EM OPERAÇÃO DO PRÓXIMO UR

- Para o funcionamento do próximo UR, sua válvula de bloqueio automático VBM-UR-AG será acionada. No entanto, assim que esta válvula se abrir, haverá uma redução repentina de vazão do(s) UR(s) em funcionamento, o que pode provocar uma queda abrupta na temperatura de saída de água gelada dos URs em funcionamento. Portanto, antes do acionamento da válvula de bloqueio do próximo UR (conforme indicado nas lógicas de operação dos *Chiller* – ver item 4.13.1), a BAGX será acionada, o que deverá provocar um aumento momentâneo de vazão no(s) URs em funcionamento. Neste momento, o sistema passa a operar em configuração típica de um sistema com circuito primário e secundário, com vazão no circuito primário superior à vazão no circuito secundário.
- Para a operação do próximo UR, a BAGX deverá entrar em funcionamento e operar com sua vazão fixa (com frequência de 47 Hz no SIC-70).
- Logo em seguida, será enviado o comando de abertura da VBM-UR-AG do próximo UR. Neste momento, mesmo com a BAGX em operação, haverá uma redução de vazão no(s) URs em funcionamento.
- Com os N+1 *Chillers* em funcionamento, estes operam modulando a capacidade, em função do *setpoint* da temperatura de saída de água gelada de cada UR (6,0 °C), conforme a necessidade de carga térmica do processo.
- Com os N+1 *Chillers* em operação, após 809 s do seu acionamento, a BAGX permanece em funcionamento, porém sob a lógica de controle de vazão mínima requerida nos FAL-x1 de cada *Chiller* em funcionamento, conforme o valor normal de *setpoint* de controle $\mathbf{V_{SP\text{-}FIC\text{-}x1}}$ = 179 m³/h.
- Com o aumento da carga térmica do edifício e da vazão total das BAGMs, caso a BAGX atinja o seu valor mínimo e permaneça assim por um período (19 Hz durante 349 s – valores configuráveis), então a BAGX será desligada e o sistema volta a operar apenas com a vazão total das BAGMs.

CONDIÇÕES DE FALHA

- Com uma BAGX em operação, em caso de falha, como o sistema opera em barrilete, a 2ª BAGX (reserva) entrará automaticamente em operação, com a mesma rotina de entrada em operação e controle da 1ª BAGX, conforme descrito anteriormente.
- Neste caso, será enviada uma mensagem de falha ao sistema de supervisão e a BAGX em falha só voltará a operar normalmente após sair da condição de falha e apenas quando for solicitada nova partida pela rotina de funcionamento da BAGX.

4.13.4 PROTEÇÃO CONTRA FALTA DE FLUXO NA BAGX (APLICÁVEL A QUALQUER BOMBA COM VAZÃO VARIÁVEL)

A BAGX operante possui vazão variável e em princípio não há uma vazão mínima a ser estabelecida. Considerando que a falha de falta de fluxo (quando acontece) ocorre na partida da bomba, será

aplicada uma rotina específica, em função do valor atual de vazão registrado nos FIC-x1 dos *Chillers* em operação, em relação ao *setpoint* estabelecido, que funcionará como proteção contra falta de fluxo nas respectivas bombas. A seguir, o descritivo da lógica de controle:

- Após a entrada em funcionamento da BAGX operante, o alarme de falha FAL-x1 dos *Chillers* em operação envia um sinal para o inversor de frequência (por meio do controlador SIC-70) de modo aumentar a rotação e a vazão da BAGX para atender o *setpoint* nos FIC-x1. Normalmente, o inversor aumenta a frequência até atingir o valor do *setpoint*.
- Se após a partida da BAGX, a frequência no inversor (SI-71 ou SI-72) chegar ao valor máximo (60 Hz) e, após um tempo a ser definido (ex. 193 s - valor, configurável), o valor dos FIC-x1s não atingirem o *setpoint*, então será acionado um sinal de falha de funcionamento para o intertravamento elétrico da BAGX operante devido a baixo fluxo, e a BAGX deverá ser desligada com sinal de falha. Será ainda gerada uma mensagem de falha por falta de fluxo da BAGX na tela de supervisão.
- Em seguida, será enviado um sinal para a entrada em funcionamento da BAGX reserva, com os requisitos normais de operação.



5. OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES SOBRE A OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE AR CONDICIONADO

O sistema de ar condicionado não deve ser concebido apenas para "refrigerar o ar", pois o seu funcionamento tem como finalidade garantir o conforto dos usuários e a qualidade do ar nos ambientes condicionados. Além disso, o sistema deve ser concebido para operar de maneira confiável e com os níveis de eficiência energética previamente estabelecidos em projeto.

O sistema de ar condicionado requer a atuação de uma equipe técnica de operação e manutenção qualificada. Considerando que este seja o principal sistema predial (pelo menos é que mais afeta a produtividade dos usuários e o que mais consome energia), é muito importante que o supervisor da equipe de operação e manutenção possua uma formação em engenharia, com especialização em sistemas de ar condicionado. Porém, isso é raro no Brasil.

Conforme mencionado anteriormente, é muito importante que a equipe de ar condicionado seja responsável por operar o sistema de ar condicionado utilizando o sistema de automação como ferramenta de controle e otimização.

Para um sistema de ar condicionado com um bom projeto, onde foram aplicados conceitos de eficiência energética, no dia a dia de operação e ao longo de sua vida útil, há muitas oportunidades de otimização do sistema por parte da equipe de operação. Mesmo com um bom sistema de automação, sempre será possível atuar sobre os mecanismos de controle para melhorar o conforto e a eficiência energética.

No entanto, se o sistema de automação estiver inadequado e não atender os requisitos de operação confiável do sistema, se a equipe de operação não possuir conhecimento suficiente para detectar os problemas e solicitar as correções, será comum verificar o sistema de ar condicionado operando em modo manual.

Em um processo de retrocomissionamento, quanto mais eficiente for o conceito do projeto inicial, maior será a quantidade de desvios operacionais verificados em um sistema existente e maiores serão as oportunidades de melhorias. A maioria desses desvios se deve à inadequação do sistema de automação associada à falta de conhecimento da equipe de operação.

Os processos de correção ou de modernização de um sistema de água gelada que priorizam apenas a substituição de equipamentos (normalmente os *Chillers*), e que têm como objetivo principal a melhoria da eficiência energética, muitas vezes trazem resultados abaixo do esperado, porque durante a análise inicial não foram considerados muitos aspectos operacionais que afetam o desempenho de todo sistema, muitos deles resultantes da falta de qualificação e capacitação necessária da equipe de operação e manutenção.

Um dos principais resultados do retrocomissionamento, a partir da fase de implantação das medidas de correção e otimização, é a capacitação da equipe de operação que precisa ser instruída para operar um sistema orientado à garantia do conforto térmico e à contínua otimização da eficiência energética.

Em relação ao conforto térmico, não se trata apenas de aumentar ou diminuir a temperatura do ar ambiente após uma solicitação, mas de entender o perfil de operação de todo o sistema de ar condicionado, desde a CAG até os elementos de insuflação e seus elementos de controle do ambiente e suas limitações. É comum verificar erros de projeto ou de instalação com os quais a equipe de operação precisa conviver e atuar para diminuir os impactos negativos aos usuários. Os usuários também podem ser parte do problema quando exigem condições ambientes adversas aos requisitos de operação de projeto.

Sobre a eficiência energética, é fundamental o conhecimento detalhado do funcionamento do sistema e dos requisitos de projeto para estabelecer ações (contínuas) de otimização.

Em um novo sistema, quando o processo de comissionamento é bem aplicado desde o projeto até a ocupação e operação, são fornecidos os manuais dos sistemas adequados e os requisitos de treinamento e capacitação para as equipes de operação e manutenção do sistema.

5.2 ASPECTOS OPERACIONAIS DO SISTEMA DE ÁGUA GELADA – APPROACH

O *approach* (tratado no item 6.2 do Volume I) é um parâmetro essencial para avaliação do desempenho dos trocadores de calor dos *Chillers* e das torres de resfriamento. Também pode ser aplicado na análise dos condicionadores de ar, mas neste caso deve ser associado à parcela de desumidificação indicada pelo diferencial de umidade absoluta na serpentina.

5.2.1 *APPROACH* NOS TROCADORES DOS *CHILLERS*

Na análise operacional do desempenho de um *Chiller*, a verificação do *Approach* é essencial, tão importante quanto à verificação da capacidade, potência absorvida e o COP. É de simples verificação e pode indicar os possíveis desvios de desempenho do *Chiller*. Apesar de raramente serem fornecidos, devem constar como itens obrigatórios de projeto e requeridos nas propostas apresentadas pelos fornecedores dos *Chillers*.

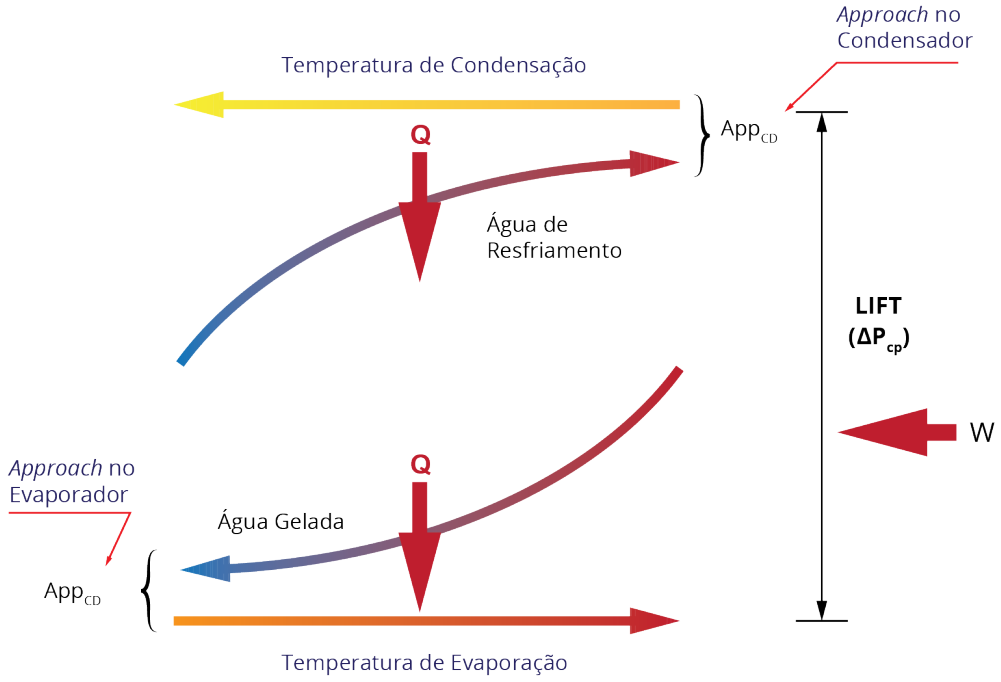
Um *approach* elevado em relação ao valor de projeto sempre é um indicativo de baixo desempenho (ou baixa eficácia) em um equipamento. Porém um *approach* muito baixo em um trocador de um *Chiller* também pode indicar indiretamente problemas de desempenho.

O *approach* de projeto é resultado do dimensionamento prévio do evaporador e do condensador. Quanto menor o *approach* de projeto, mais eficiente será o *Chiller*.

A Figura 41 ilustra o perfil de temperaturas ao longo do condensador e do evaporador de um *Chiller* e a indicação do *approach* em cada trocador.

Já o *approach* de operação depende de alguns fatores externos, por exemplo, o tratamento aplicado na água gelada (no evaporador) e da água de resfriamento (no condensador) para manter os requisitos de qualidade e pureza da água solicitados pelos fabricantes dos equipamentos do sistema de água gelada, de forma a manter as características físico-químicas da água dentro de limites aceitáveis e evitar o acumulo de sujidade (componentes incrustantes, corrosivos ou agentes biológicos) nos trocadores de calor.

Figura 41 – *Approach* no Condensador e no Evaporador de um *Chiller*



Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 33 – Impacto do *approach* no desempenho dos *Chillers*, causas prováveis e recomendações de manutenção

Trocador	*Approach*	Resultado	Provável Causa	Recomendação
Evaporador	Alto	Diminuição da Capacidade	Sujeira no Evaporador, no lado água gelada	Limpeza dos tubos do Evaporador
Condensador	Normal			
Evaporador	Normal	Aumento do Consumo de Energia	Sujeira no Condensador, no lado água de resfriamento	Limpeza dos tubos do Condensador
Condensador	Alto			
Evaporador	Alto	Diminuição da Capacidade	Carga de fluido refrigerante baixa	Corrigir a carga de fluido refrigerante
Condensador	Baixo			
Evaporador	Baixo	Aumento do Consumo de Energia	Carga de fluido refrigerante excessiva	Corrigir a carga de fluido refrigerante
Condensador	Alto			
Evaporador	Alto	Diminuição da Capacidade e Aumento do Consumo de Energia	Sujeira no Condensador e carga de fluido refrigerante baixa	Limpeza no Evaporador e Condensador e Corrigir a carga de fluido refrigerante
Condensador	Alto			

Fonte: Elaboração do autor.

O *approach* também pode ser afetado pela carga de fluido refrigerante inadequada no *Chiller*, pois, se estiver excessiva, resultará em acúmulo de líquido no condensador e provocará um aumento da pressão e temperatura de condensação. Se a carga estiver insuficiente (falta de fluido refrigerante no circuito), resultará na diminuição do nível de líquido nos evaporadores inundados ou na formação de *flash gas* no dispositivo de expansão dos evaporadores com expansão seca, o que provocará uma diminuição da pressão e temperatura de evaporação.

O Quadro 33 apresenta alguns indicativos de baixo desempenho de um *Chiller* e suas causas a partir da verificação dos "*approaches*" atuais.

É importante observar que as análises devem ser realizadas apenas com o *Chiller* operando com 100% da carga e sempre simultâneas nos dois trocadores do *Chiller*. O *approach* de referência deve ser o valor de projeto. É muito comum o técnico desconhecer os valores reais de um projeto e adotar valores típicos. Os termos alto e baixo podem variar muito na ocasião da análise. *Chillers* de baixa eficiência podem ter *approaches* de projeto bem elevados, de 2,0 ºC ou mais. *Chillers* de alta eficiência propiciam *approaches* de até 0,1 ºC. Portanto, 0,7 ºC de *approach* pode ser um valor muito alto para um *Chiller* de alta eficiência ou pode indicar um valor baixo para um *Chiller* de baixa eficiência de projeto.

5.2.2 *APPROACH* NAS TORRES DE RESFRIAMENTO

O *approach* em torre de resfriamento é a diferença entre a temperatura de saída de água (temperatura da bacia) e a temperatura de bulbo úmido do ar externo (T_{BU}), medida em local próximo à entrada de ar nas torres, à sombra.

Apesar do critério de avaliação apenas considerar ao elevação do *approach*, é bem mais complicado de analisar, pois na condição de análise, com a vazão de água de resfriamento de projeto e os ventiladores na máxima frequência (quando houver inversores),

se a T_{BU} for menor que o valor de projeto, o *approach* da nova condição irá aumentar.

A Tabela 17 indica as condições de projeto de desempenho de uma torre de resfriamento a partir das condições típicas de um projeto tradicional (destacadas em vermelho), mantendo a vazão de água e o diferencial de temperatura de água, porém variando a T_{BU}.

Para melhor ilustrar, a partir da condição de projeto tradicional, com o *approach* de 5,5 °C, caso a torre esteja atendendo o mesmo *Chiller*, com o mesmo calor rejeitado para a torre, porém em um dia, com TBU igual a 19,0 °C, o *approach* será de 7,4 °C.

Ao contrário do que se possa imaginar, que o *approach* poderia se manter, os valores apresentados na Tabela 17 indicam que quanto menor a T_{BU}, maior será o valor do *approach* de projeto para uma determinada torre de resfriamento operando com vazão constante.

Portanto, apesar de ser muito importante monitorar o *approach* das torres de resfriamento, é preciso solicitar ao fabricante das torres, na ocasião do seu fornecimento, uma tabela similar. Para a análise em campo, é fundamental que esses dados sejam monitorados pelo sistema de automação, com leituras confiáveis, e é necessário que a análise seja realizada com a mesma vazão do projeto e a mesma capacidade. De outra forma, para cada condição seria necessário utilizar as curvas ou o *software* de cálculo do fabricante e realizar análises a partir dos dados de campo.

Tabela 17 – Variação do *approach* de projeto em torre de resfriamento operando com a mesma vazão de água e o mesmo diferencial de temperatura de água

T_{BU} Ar	Vazão	$T_{Ent\ Agua}$	$T_{Sai.Agua}$	Capacidade	approach
(°C)	(m³/h)	(°C)	(°C)	(kW)	(°C)
15,0	250	23,8	28,5	1.375	8,8
16,0		24,3	29,0		8,3
17,0		25,0	29,7		8,0
18,0		25,8	30,5		7,8
19,0		26,4	31,1		7,4
20,0		27,0	31,7		7,0
21,0		27,7	32,4		6,7
22,0		28,3	33,0		6,3
23,0		29,0	33,7		6,0
24,0		29,5	35,0		5,5
25,0		30,1	34,8		5,1
26,0		30,9	35,6		4,9
27,0		31,5	36,2		4,5

Fonte: Elaboração do autor.

5.3 SÍNDROME DE BAIXO ΔT

5.3.1 SISTEMAS DE ÁGUA GELADA COM CIRCUITO PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO

A síndrome de baixo ΔT no circuito secundário de água gelada é um problema que tem origem em várias causas ou de vários outros problemas operacionais do sistema de ar condicionado.

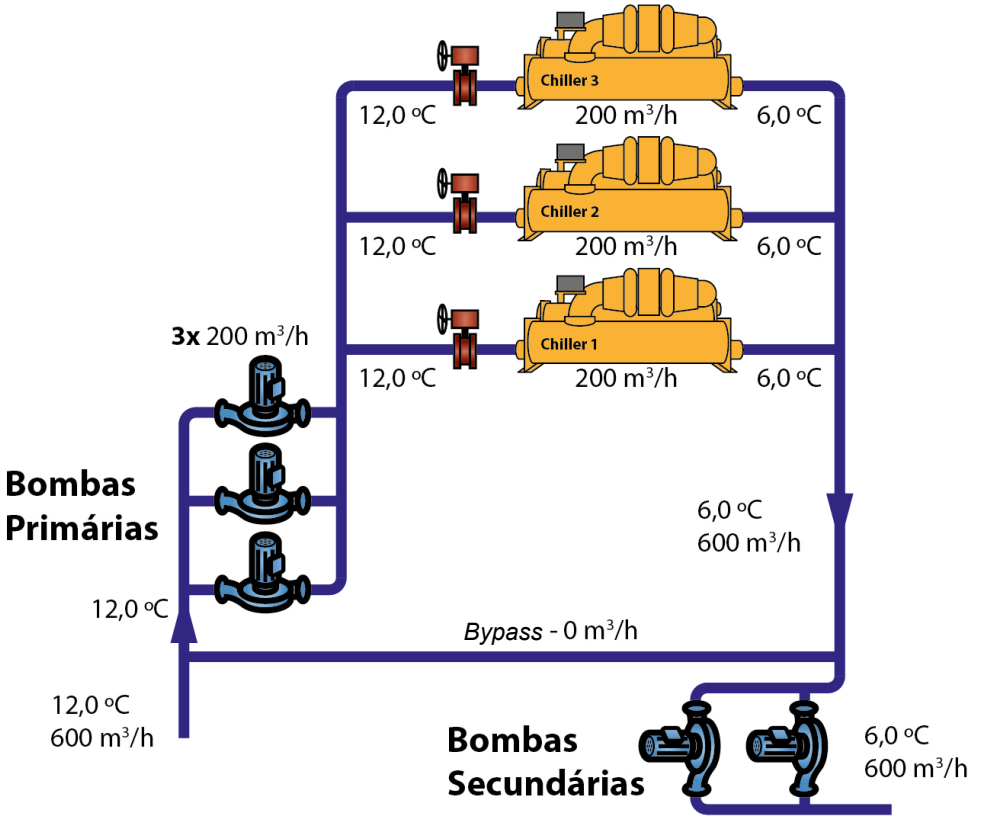
Para melhor descrever a síndrome de baixo ΔT, as Figuras 42 a 44 mostram o fluxograma esquemático de um sistema de água gelada com três *Chillers*, com circuito primário e secundário, operando em diferentes condições de operação.

As condições de projeto são apresentadas na Figura 42 com o sistema operando com 100% de capacidade. Cada *Chiller* opera com vazão de projeto constante de 200 m³/h e com água gelada resfriada de 12,0 ºC para 6,0 ºC. O sistema possui três BAGPs para atender os *Chillers* e duas BAGSs para atender os condicionadores de ar. Nesta condição, teoricamente, a capacidade e a vazão total do circuito primário de água gelada, que circula pelos *Chillers* são iguais à capacidade e vazão total do circuito secundário, que circula pelos condicionadores de ar. A vazão de água gelada pelo *bypass* (livre) é igual a 0 (zero).

A Figura 43 ilustra o sistema de água gelada com 67% de sua capacidade total, com dois *Chillers* operando, cada um com 100% de capacidade. Nesta condição, a vazão total do circuito primário de água gelada (que circula pelos *Chillers*), diminui para 400 m³/h, mas é superior à vazão total do circuito secundário, que circula pelos condicionadores de ar, que diminui para 283 m³/h.

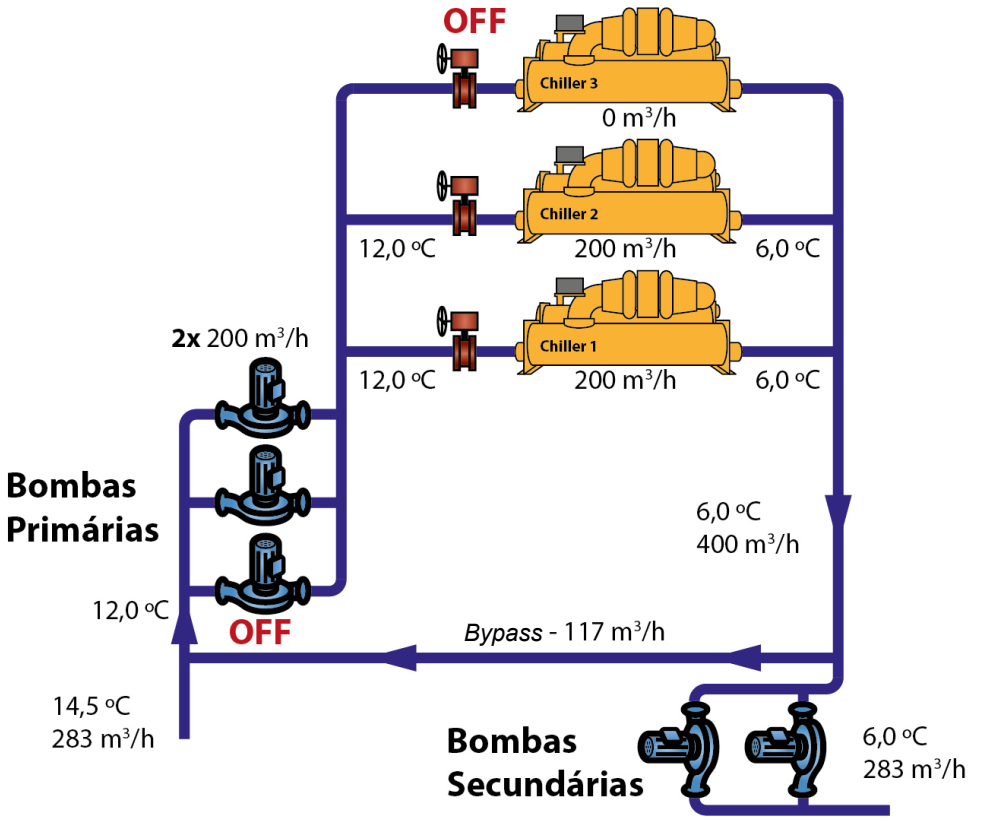
É importante observar que a partir dos dados teóricos do comportamento de uma serpentina de resfriamento de um condicionador de ar, com 67%

Figura 42 – Sistema de água gelada com circuito primário e secundário, com três *Chillers* operando com 100% de capacidade para atender a carga térmica (máxima) do edifício



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 43 – Sistema de água gelada com circuito primário e secundário, com dois *Chillers* operando com 100% de capacidade para atender a carga térmica atual do edifício (67%)



Fonte: Elaboração do autor.

de capacidade, considerando as variações de vazão de ar e de temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar (que irão impactar também na relação de retirada de calor sensível e calor latente), a vazão de água gelada diminui para aproximadamente 47%, ou seja, há uma redução de vazão bem maior do que a redução de capacidade.

Além disso, a condição da Figura 43 mostra o momento imediato da parada do 3º *Chiller*. Ao contrário do que se pode esperar quando se imagina uma relação puramente proporcional, a vazão no *bypass* que deveria ser 0 (zero), é "positiva" (117 m³/h).

Como mencionado no item 4.8, é importante observar que a lógica de controle da sequência de entrada em operação (ou parada) de *Chillers* neste tipo de sistema, que utiliza um medidor de vazão na tubulação de *bypass* para a tomada de decisão da entrada em operação ou parada de um *Chiller*, não é adequada e deve ser evitada.

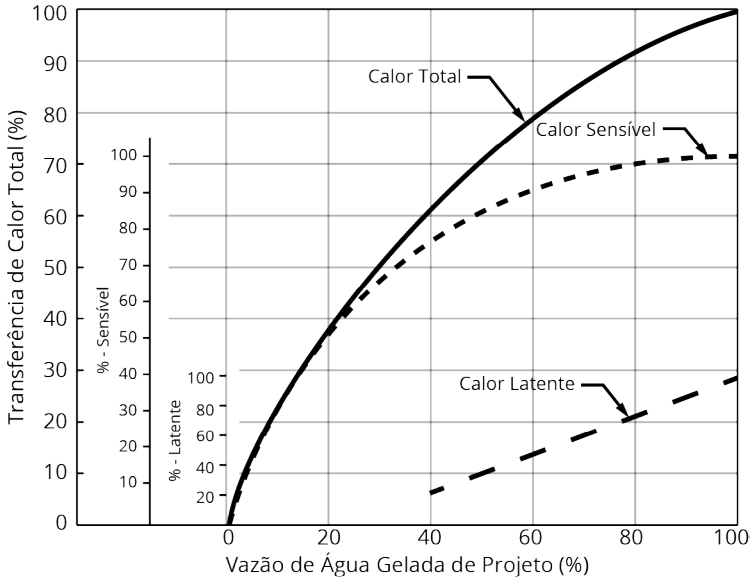
O Gráfico 14 mostra a relação teórica entre a porcentagem de vazão de água gelada e a porcentagem de capacidade de resfriamento de uma serpentina e as variações das parcelas de calor sensível e latente.

No entanto, devido a várias causas, a vazão do circuito secundário pode aumentar muito e alterar as condições de operação do sistema. A Figura 44 mostra o sistema operando com vazão excessiva no circuito secundário, evidenciando a síndrome de baixo ΔT.

Os dados da Figura 44 indicam que a síndrome de baixo ΔT é resultado de um ciclo que se estabiliza em uma condição muito diferente da apresentada na Figura 43:

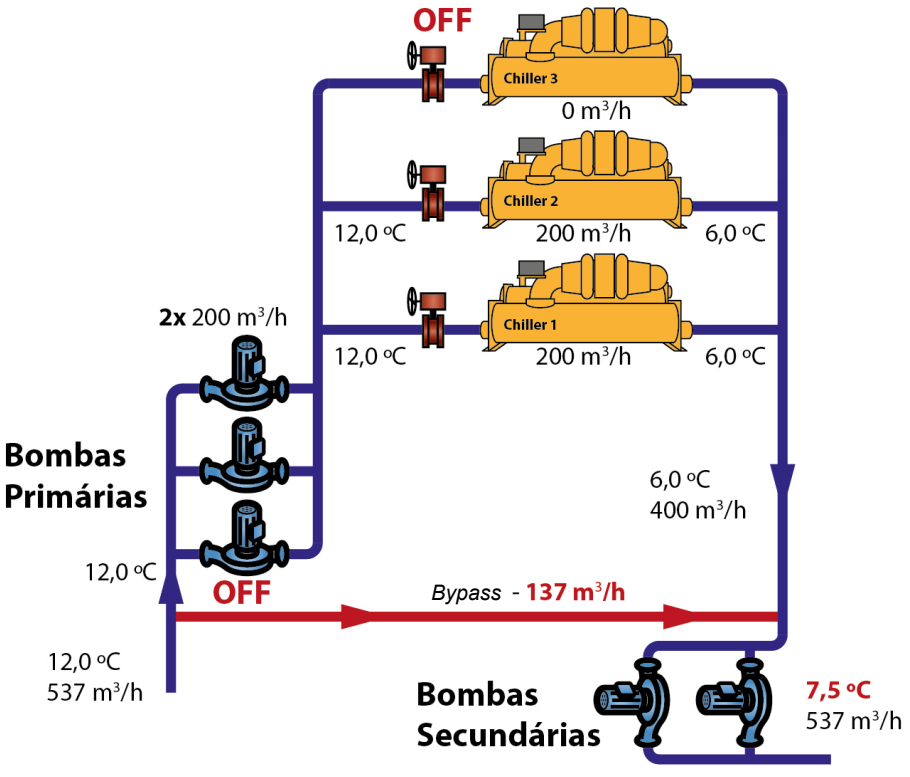
- Inicialmente, devido às causas externas, a vazão no circuito secundário aumenta até um pouco acima da vazão do circuito primário (400 m³/h);
- Com a vazão no circuito secundário acima da vazão do circuito primário o fluxo na tubulação

Gráfico 14 – Relação entre a porcentagem de vazão de água gelada e a porcentagem de capacidade de resfriamento de uma serpentina



Fonte: ASHRAE, 2015.

Figura 44 – Sistema de água gelada com circuito primário e secundário, com dois *Chillers* operando com 100% de capacidade para atender a carga térmica atual do edifício (67%), que sofre com a síndrome de baixo ΔT



Fonte: Elaboração do autor.

de *bypass* é invertido. Com isso, há uma mistura do fluxo de água mais quente do *bypass*, com o fluxo do circuito primário a 6,0 °C, resultando em uma temperatura de alimentação para o circuito secundário mais elevada;

- Com a temperatura de entrada nas serpentinas dos condicionadores de ar mais elevadas, o controlador da serpentina irá solicitar maior abertura das válvulas de controle de vazão de água gelada nos condicionadores de ar, o que resultará em maior vazão total no circuito secundário;
- Com a vazão no circuito primário ainda constante (não houve aumento de capacidade e não foi solicitado outro *Chiller* e outra BAGP), a vazão do *bypass* aumenta um pouco mais;
- Com maior vazão "negativa" no *bypass*, maior a temperatura de alimentação no circuito secundário e assim se sucede a rotina, até o ponto de equilíbrio indicado na Figura 44, com a temperatura de alimentação para o circuito secundário 1,5 °C acima da temperatura de saída dos *Chillers*.

Este é o efeito específico da síndrome de baixo ΔT no sistema de água gelada. No entanto, as principais causas geradoras normalmente são resultados da má operação de todo sistema de ar condicionado. A seguir, uma lista de problemas que irão resultar em aumento da vazão de água gelada no circuito secundário:

- *Setpoint* de temperatura de insuflação nos condicionadores muito baixo, fora das condições de projeto;
- Válvulas de controle de vazão de água gelada inoperantes e mantidas 100% abertas;
- Falta de calibração de sensores (vários);
- Falta de intertravamento da válvula de controle de vazão de água gelada com o ventilador do condicionador de ar. Quando o ventilador é desligado, a válvula deve retornar a posição "fechada";
- Vazamento (passagem) em válvula de controle de vazão de água gelada fechada (*close-off*);
- Filtro de ar sujo;
- Incrustação na serpentina (tanto no lado da água, como no lado do ar – devido à filtragem insuficiente ou inexistente);
- Balanceamento hidrônico não realizado;
- Serpentinas mal selecionadas;
- Válvulas de controle mal selecionadas (válvula sem autoridade);
- Ligação hidráulica invertida do condicionador de ar;
- Substituição de condicionadores de ar e válvulas de controle de vazão de água gelada sem respeitar o ΔT de projeto original;
- Temperatura de alimentação de água gelada para o circuito secundário elevada, antes do início do efeito da síndrome de baixo ΔT – devido à válvula de bloqueio motorizada de um *Chiller* parado mal fechada, com fluxo (passagem) de água de retorno (em torno de 12 °C), que se mistura com o fluxo de água gelada do(s) *Chiller*(s) em operação;

A maioria dos problemas é de simples solução, mas exige a aplicação de um plano de operação e manutenção orientado ao desempenho do sistema e não apenas ao funcionamento dos equipamentos. No entanto, a investigação e análise das causas em cada sistema podem trazer melhores resultados com a aplicação de um processo de retrocomissionamento.

Os impactos da síndrome de baixo ΔT no sistema de água gelada com circuito primário e secundário são:

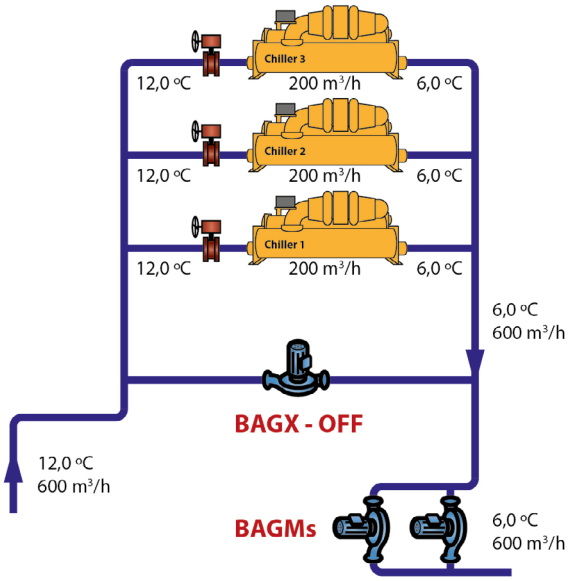
- Maior consumo nas bombas do circuito secundário de água gelada (BAGSs) em função da maior vazão de água gelada;
- Maior número de *Chillers* em operação para evitar fluxo invertido no *bypass* e a mistura da água "quente" do retorno pelo excesso de vazão da BAGSs;
- Maior consumo de energia com a operação de mais *Chillers*, incluindo bombas do circuito primário de água gelada (BAGPs), bombas água de resfriamento (BACs) e ventiladores das torres de resfriamento.

5.3.2 SISTEMAS DE CIRCUITO ÚNICO COM VAZÃO DE ÁGUA GELADA VARIÁVEL

Apesar de ocorrer também em sistemas de circuito único com vazão de água gelada variável, o baixo ΔT gera um menor impacto no sistema.

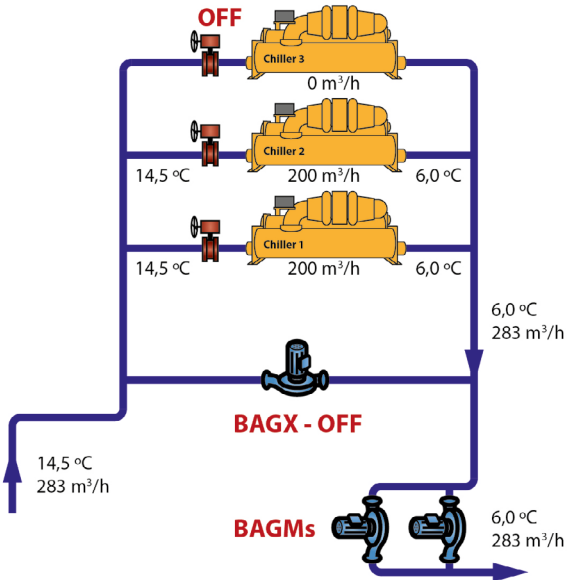
A Figura 45 ilustra um exemplo com três *Chillers*, operando com 100% de capacidade, condição similar à Figura 42.

Figura 45 – Sistema de circuito único com vazão de água gelada variável, com três *Chillers* operando com 100% de capacidade para atender a carga térmica (máxima) do edifício



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 46 – Sistema de circuito único com vazão de água gelada variável, com dois *Chillers* operando com 100% de capacidade para atender a carga térmica atual do edifício (67%)

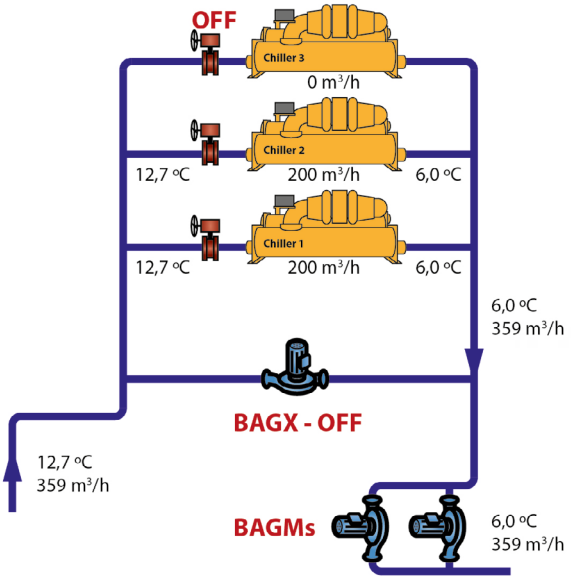


Fonte: Elaboração do autor.

A Figura 46 ilustra o sistema de água gelada com 67% de sua capacidade total, com dois *Chillers* operando, cada um com 100% de capacidade, porém em condições de temperatura de entrada e vazão de água gelada diferentes da condição de projeto dos *Chillers* operando em 100% de capacidade. Nesta condição, a vazão total que circula pelos *Chillers* é a mesma vazão total do circuito secundário, que circula pelos condicionadores de ar (283 m³/h), portanto, a temperatura de retorno de água "quente" para os *Chillers* será maior (14,5 °C).

A Figura 47 mostra o sistema operando com 67% de sua capacidade total, com dois *Chillers* operando, cada um com 100% de capacidade, porém com os problemas da síndrome de baixo ΔT. Neste caso, a vazão total (359 m³/h) está excessiva quando comparada com a vazão desejada para esta condição de carga (283 m³/h), mostrada na Figura 46. Contudo, quando se compara aos resultados da Figura 44 (537 m³/h – no sistema com circuito primário e secundário), a vazão total de água gelada é bem menor porque neste caso não ocorre o efeito cíclico causado pelo fluxo invertido de água "quente" no *bypass*, que eleva a temperatura de alimentação de água gelada para os condicionadores. Portanto, neste caso, a temperatura de alimentação de água gelada para os condicionadores de ar será sempre o valor do *setpoint* da temperatura de saída de água gelada dos *Chillers* (no caso, 6,0 °C).

Figura 47 – Sistema de circuito único com vazão de água gelada variável, com dois *Chillers* operando com 100% de capacidade para atender a carga térmica atual do edifício (67%), que sofre com a síndrome de baixo ΔT.



Fonte: Elaboração do autor.

Comparando o efeito nos dois tipos de sistema, entre a vazão teórica (283 m³/h) e a vazão atual por causa da síndrome de baixo ΔT, o sistema de água

gelada com circuito primário e secundário teve um aumento de 90% de vazão no circuito secundário, enquanto que no sistema de circuito único com vazão de água gelada variável, o aumento de vazão no circuito único foi de 27%.

5.4 FATOS E FALÁCIAS NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE ÁGUA GELADA

5.4.1 TEMPERATURA DE ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA GELADA PARA OS CONDICIONADORES DE AR

A **afirmação** "A temperatura de alimentação de água gelada para o circuito secundário é maior que a temperatura de saída de água gelada dos *Chillers* (barrilete de saída) porque há ganhos de calor na tubulação e nas BAGSs". Há casos nos quais o próprio projeto considera uma carga térmica extra somente para estes ganhos. "Normalmente o aumento de temperatura é de 1,0 ºC a 2,0 ºC e inclusive já foi verificado em campo" **é falsa**!

A Tabela 18 apresenta alguns dados fictícios de um projeto "absurdo" para melhor ilustrar esta questão.

Nota:

- Tubulação muito longa até o *Fan Coil*.
- Vazão de água gelada muito baixa, velocidade na tubulação é de apenas 0,6 m/s.
- Tubulação sem isolamento térmico.

Com a utilização de um *software* de aplicação de isolamento térmico em tubulação de água gelada, com todos esses desvios (sem isolamento térmico), verificou-se os seguintes resultados:

- Ganho de Calor: 115 kW.
- Temperatura da água gelada na entrada do *Fan Coil*: **6,78 ºC**.
- Aumento de temperatura: 0,78 ºC.

Ou seja, com todos os valores absurdos considerados, o ganho foi de 0,78 ºC.

A Tabela 19 apresenta os dados de um prédio existente, com características reais.

Os novos resultados foram os seguintes:

- Ganho de Calor: 5,3 kW;
- Temperatura da Água gelada na entrada do *Fan Coil*: **6,04 ºC**;
- **Aumento de temperatura: 0,04 ºC.**

Ou seja, não se pode verificar isso em campo. Qualquer diferença é incerteza das leituras de temperatura. Para a vazão de projeto (no caso, 450 m³/h), o aumento de temperatura é de apenas 0,01 ºC.

E esta diferença deve ser mesmo mínima, porque, apesar de pensarmos que a tubulação pode ser longa, nesse caso a tubulação é um trocador de calor onde a água gelada é "aquecida" pelo ar externo por con-

Tabela 18 – Dados de projeto "absurdo" de um sistema de água gelada.

Comprimento da tubulação entre a saída do *Chiller* e a entrada do último *Fan Coil*	(m)	500
Diâmetro da tubulação (OD 12 in ou DN 300) (sem nenhuma redução)	(mm)	323,9
Temperatura de água gelada na saída do *Chiller*	(ºC)	6,0
Temperatura do ar ambiente por onde passa a tubulação	(ºC)	35,0
Vazão de água gelada atual	(m³/h)	125
Espessura do isolamento	(mm)	0

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 19 – Dados de projeto real de um sistema de água gelada.

Comprimento da tubulação entre a saída do *Chiller* e a entrada do último *Fan Coil*	(m)	150
Diâmetro médio da tubulação (OD 8 in ou DN 200) considerando 5 reduções de OD 12 in (ou DN 300) para OD 4 in (ou DN 100)	(mm)	219,0
Temperatura de água gelada na saída do *Chiller*	(ºC)	6,0
Temperatura do ar ambiente por onde passa a tubulação (Prumada sobe por *shaft* interno no edifício)	(ºC)	25,0
Vazão de água gelada atual (ainda muito baixa)	(m³/h)	125
Espessura do isolamento (conforme ***ASHRAE Standard 90.1 - 2010***)	(mm)	40

Fonte: Elaboração do autor.

vecção natural (que tem um coeficiente de transferência de calor muito baixo). Considerando ainda o isolamento térmico, o coeficiente global é mínimo.

O outro argumento é do ganho de calor nas BAGSs (após os *Chillers*). No exemplo anterior, de um sistema com vazão de água gelada de projeto de 450 m³/h e considerando um diferencial de 5,5 ºC (típico, mas conservador), a capacidade do sistema será de 2.878 kW. Considerando ainda a altura manométrica de 25,0 m.c.a. na condição de projeto e o rendimento da bomba em 77%, o ganho de calor será de 41 kW, o que significa um aumento de 0,08 ºC na temperatura de alimentação de água gelada para os condicionadores de ar.

Portanto, quando se verifica uma diferença real entre a temperatura de água gelada na saída do painel de um *Chiller* e a temperatura de entrada nos condicionadores de ar, as prováveis causas são as seguintes:

- Excesso de vazão no circuito secundário que provoca o fluxo invertido, de água "quente" do retorno dos condicionadores de ar pelo *bypass*. Como resultado, o fluxo de água gelada para todos os condicionadores de ar sairá com temperatura mais elevada;
- As BAGPs não são dedicadas aos *Chillers*, e por meio de um barrilete no recalque das bombas, a vazão é distribuída para os *Chillers*. Então, a válvula de bloqueio motorizada de água gelada em um dos *Chillers* (ou mais de um) parados não está totalmente fechada e permite o fluxo parcial de água "quente" de retorno para a saída do *Chiller* parado. Neste caso, a vazão parcial que passa pelo(s) *Chiller*(s) parado(s) sai com a temperatura de entrada e se mistura com a temperatura de saída do *Chiller* que está funcionando. Como resultado, o fluxo de água gelada para todos os condicionadores de ar sairá com temperatura mais elevada;
- Poços para a instalação do sensor de temperatura de água gelada na entrada dos condicionadores de ar são muito curtos e não atingem o fluxo de água gelada na tubulação;
- Caso a temperatura esteja elevada em apenas um condicionador de ar, as prováveis causas são:
  - A interligação das conexões de água gelada do condicionador de ar com as prumadas de alimentação e retorno estão invertidas, neste caso a leitura indicará a temperatura de saída;
  - Erro de leitura, com instrumentos diferentes e um deles descalibrado;
  - Poço para a instalação do sensor de temperatura de água gelada na entrada do condicionador de ar é muito curto.

5.4.2 VAZÃO DE ÁGUA GELADA

A **afirmação**: "A vazão de água gelada deve ser sempre a vazão de projeto senão o desempenho do *Chiller* vai diminuir" **é falsa**!

Uma vez definido o *setpoint* de saída de água gelada de um *Chiller*, a vazão de água gelada terá um impacto mínimo no desempenho do *Chiller* (ver item 6.3 do Volume I).

É importante observar que a diminuição ou aumento da vazão de água gelada dentro de uma boa faixa em relação à vazão de projeto (até +/-50% em alguns casos) não traz nenhum impacto no *approach* do evaporador.

No entanto, quando houver vários *Chillers* de mesma capacidade em paralelo, é muito importante que a vazão de cada *Chiller* seja a mesma, senão os *Chillers* irão operar em cargas parciais diferentes. Portanto, é imprescindível o balanceamento de água gelada nos *Chillers*. Quando os *Chillers* em paralelo tiverem capacidades de projeto diferentes, o balanceamento deverá ser feito considerando a proporcionalidade das capacidades.

5.4.3 VAZÃO DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO BAIXA

A **afirmação**: "A vazão de água de resfriamento nunca deve ser menor que a vazão de projeto senão o desempenho do *Chiller* vai diminuir" **é verdadeira**!

Em *Chillers* com condensação a água, o *setpoint* a ser controlado é o da temperatura de entrada de água no condensador. Neste caso, a diminuição da vazão de água de resfriamento (em relação ao valor de projeto) trará um impacto negativo no desempenho de um *Chiller*, pois com a redução da vazão, para uma determinada capacidade, haverá um aumento na temperatura de saída e na temperatura de condensação. Isto resulta em maior *lift* no compressor e maior consumo de energia (ver item 6.4 do Volume I).

5.4.4 VAZÃO DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO ELEVADA

A **afirmação**: "Se aumentar a vazão de água de resfriamento no condensador do *Chiller*, acima da vazão de projeto o desempenho do *Chiller* vai aumentar" – **é verdadeira e falsa**!

É fato que o COP do *Chiller* deve aumentar. Porém, ao contrário do item anterior, analisando o conjunto *Chiller* + Bomba (BAC) + torre de resfriamento, o aumento da vazão irá resultar em aumento da potência do motor da BAC e a temperatura de saída da torre de resfriamento pode aumentar, pois o desempenho da torre diminui um pouco quando a vazão é maior. Portanto, a falácia é pensar que o COP do sistema irá aumentar.

5.4.5 POSIÇÃO DE INSTALAÇÃO DAS VÁLVULAS DE CONTROLE DE VAZÃO DE ÁGUA GELADA, VÁLVULAS DE BALANCEAMENTO E VÁLVULAS DE BLOQUEIO MOTORIZADAS

A **afirmação**: "Estas válvulas devem ser instaladas apenas na tubulação de saída do equipamento." **é falsa**!

O fluxo de água que entra no equipamento é exatamente o mesmo que sai, a não ser que haja consumo de água (mas este trata de processo). Portanto, se a válvula de balanceamento ou o medidor de vazão de água requerem um trecho reto mínimo (à jusante e à montante das singularidades), deve-se priorizar a instalação destes componentes na tubulação com maior trecho reto (seja na entrada ou na saída) e as demais válvulas e componentes serão instalados na outra tubulação (ver item 4.4.10).

5.4.6 QUANTIDADE ÓTIMA DE *CHILLERS* EM OPERAÇÃO QUANDO EM CARGA PARCIAL

A **afirmação**: "Os *Chillers* funcionam com melhor desempenho em carga parcial, e por isso vale a pena operar mais *Chillers* com cargas parciais do que menos *Chillers* com cargas mais elevadas", por exemplo: 3x 66% ao invés de 2x 100%, é **falsa**!

Nos resultados de selecionamento dos *Chillers* (no cálculo do IPLV conforme o ***AHRI Standard 550/590***), o melhor COP ocorre em carga parcial porque em 100%, a temperatura de entrada de água de resfriamento utilizada é de 29,4 ºC, enquanto em 75% de carga, a temperatura é de 23,9 ºC, e 18,3 ºC em 50% de carga (ver item 5.2 do Volume I).

Na seleção de um *Chiller* com 100% e água de resfriamento entrando a 23,9 ºC ou a 18,3 ºC, o resultado do COP pode ser até 5% maior do que nas condições de 75% e 50% com as mesmas temperaturas de água de resfriamento, depende do tipo de compressor e modelo de *Chiller*. Em casos de menor COP, as diferenças são menores que 1%.

Em sistemas de circuito único com vazão variável, na comparação de três *Chillers* com 66% de carga, ao invés de dois com 100% de carga, deve-se considerar a potência do motor da terceira BAC (que é cerca de 7% da potência total de um *Chiller*). O resultado será sempre favorável para a condição com menor quantidade de *Chillers*.

Em sistemas com circuito primário e secundário, na comparação de três *Chillers* com 66% de carga ao invés de dois com 100%, deve-se considerar a potência do motor da terceira BAC e da terceira BAGP (que somadas serão cerca de 13% da potência total de um *Chiller*). O resultado será ainda mais favorável para a condição com menor quantidade de *Chillers*.



6 SEGURANÇA

Os *Chillers* são sistemas de refrigeração contendo equipamentos pressurizados e, portanto, devem atender a vários requisitos de segurança abrangendo projeto, fabricação, instalação, operação e manutenção. No Brasil as três principais normas aplicadas aos sistemas de refrigeração e seus componentes são:

- **ABNT NBR 16069:2010 – Segurança em Sistemas de Refrigeração**, que estabelece padrões para a segurança no projeto, construção, instalação e operação de sistemas de refrigeração, e foi baseada no ***ASHRAE Standard 15-2007***.
- **ABNT NBR 13598:2011 – Vasos de Pressão para Refrigeração**, que estabelece um conjunto de recomendações e requisitos mínimos a serem utilizados na fabricação de vasos de pressão para uso em refrigeração. Foi a primeira norma sobre segurança relacionada à refrigeração e foi baseada em parte do ***ASHRAE Standard 15:1992***. Foi publicada em 1996 e revisada em 2011 como norma complementar, mas deverá ser extinta e o seu conteúdo incorporado à **ABNT NBR 16069** em sua próxima revisão.
- **NR 13 – Norma Regulamentadora do Ministério do Trabalho e Emprego – Caldeiras e Vasos de Pressão**, que estabelece padrões de segurança de vasos de pressão em geral com vistas à proteção dos trabalhadores e faz parte de um conjunto de normas da legislação trabalhista. Foi publicada em 1978 e sua última revisão é de 2014.

6.1 ABNT NBR 16069:2010 E ABNT NBR 13598:2011

O escopo da ***ABNT NBR 16069:2010*** trata da segurança dos sistemas de refrigeração, com qualquer tipo de fluido refrigerante. Estão incluídos os seguintes tipos:

- Condicionadores de ar de janela;
- Refrigeradores domésticos;
- Sistemas comerciais de pequeno porte (*Appliances*);
- Condicionadores de ar tipo *Self-Contained*;
- Sistemas tipo *Split*;
- Sistemas tipo VRF e *Multi-Split*;
- *Chillers*;
- Sistemas de refrigeração comercial;
- Sistemas de refrigeração para supermercados;
- Sistemas de refrigeração industrial.

Apesar de ser uma grande referência para sistemas de refrigeração industrial, a ***ABNT NBR 16069:2010*** deve ser aplicada para qualquer sistema de refrigeração, pois aborda os principais aspectos de segurança a serem considerados em um sistema de refrigeração envolvendo projeto, construção, instalação e operação e estabelece regras de proteção contra acidentes que tragam danos às pessoas ou à propriedade.

As sessões da ***ABNT NBR 16069:2010*** são as seguintes:

- 3 – Termos e definições;
- 4 – Classificação de ocupação;
- 5 – Classificação do sistema de refrigeração;
- 6 – Classificação dos fluidos refrigerantes;
- 7 – Restrições de uso, em função da classificação de ocupação, do tipo de sistema e do fluido refrigerante utilizado;
- 8 – Requisitos para as instalações do sistema de refrigeração;
- 9 – Projeto de equipamentos e sistemas;
- 10 – Operação, ensaios e testes;
- 11 – Exigências gerais.

A seguir, os principais aspectos da ***ABNT NBR 16069:2010***.

6.1.1 CLASSIFICAÇÕES

A classificação quanto à ocupação estabelece os locais da instalação de sistemas de refrigeração em termos da habilidade ou capacidade das pessoas em reagir à exposição potencial ao fluido refrigerante:

- A ocupação institucional, na qual não existe a facilidade de evacuação das pessoas que circu-

lam nas áreas ocupadas, definida pelos hospitais, clínicas, celas de reclusão, etc.;

- A ocupação residencial, definida pelo ambiente familiar, também possui certas particularidades;
- A ocupação comercial abrange edifícios, escritórios comerciais, restaurantes, supermercados;
- A ocupação mercantil abrange os supermercados de grande porte e *shopping centers*;
- A ocupação industrial abrange uma área que não está aberta ao público, na qual o acesso de pessoas é controlado, em áreas de fabricação, processamento ou armazenamento de produtos. As salas de máquinas de equipamentos (por exemplo, uma central de água gelada) são consideradas áreas industriais quando o seu acesso é restrito.

A classificação de um sistema de refrigeração é estabelecida da seguinte forma:

- Sistema com alta probabilidade de vazamento é qualquer sistema que se ocorrer um vazamento de fluido refrigerante de uma conexão defeituosa, selo ou componente pode atingir a área ocupada. Sistemas típicos de alta probabilidade são os sistemas de expansão direta ou sistemas diretos (quando o evaporador ou condensador do sistema de refrigeração está em contato com o ar ambiente a ser resfriado ou aquecido) e os sistemas indiretos com sistema de "spray" aberto (em que o fluido refrigerante é capaz de produzir maior pressão que o fluido secundário). Sistemas do tipo *Split*, *Self-Contained*, *Rooftop*, Splitão e VRF são exemplos sistemas de alta probabilidade.
- Sistema de baixa probabilidade é qualquer sistema que se ocorrer um vazamento de fluido refrigerante de uma conexão defeituosa, selo ou componente não atinge a área ocupada (exceto a sala de máquinas). Sistemas típicos de baixa probabilidade são os sistemas indiretos fechados e os sistemas duplos indiretos com sistema de "spray" aberto. O *Chiller* é o exemplo mais comum de sistema de refrigeração de baixa probabilidade.

A classificação dos fluidos refrigerantes em grupos de segurança deve ser de acordo com o ***ANSI/ASHRAE Standard 34***, conforme indicado no Quadro 34.

6.1.2 RESTRIÇÕES DE USO

A sessão 7 trata das restrições de uso de um sistema de refrigeração que são resultantes das classificações das sessões 4, 5 e 6 e da carga de fluido refrigerante no sistema. A análise considera ainda a concentração limite permitida em caso de vazamento de toda carga do fluido refrigerante do sistema de refrigeração para o ambiente ocupado.

Um exemplo prático é a aplicação de sistemas com expansão direta do fluido refrigerante (ex. sistemas tipo *Split*, VRF) em um projeto de ar condicionado para um hospital. Neste caso, se ocorrer um vazamento poderá causar danos à saúde dos ocupantes, mesmo utilizando fluidos refrigerantes do grupo A1. Portanto, este tipo de sistema para aplicações em hospitais está em desacordo com a ***ABNT NBR 16069:2010***.

Por outro lado, esse hospital até pode até ter um sistema de refrigeração utilizando amônia como

Quadro 34 – Classificação dos fluidos refrigerantes em grupos de segurança, conforme a ***ABNT NBR 16069:2010*** e o ***ANSI/ASHRAE Standard 34***

Classificação dos Fluidos Refrigerantes (Grupo)		Toxicidade	
		Menor toxicidade	Maior toxicidade
Inflamabilidade	Sem propagação de chamas	A1	A2
	Baixa inflamabilidade	A2	B2
	Alta inflamabilidade	A3	B3

Fonte: Elaboração do autor.

fluido refrigerante (grupo B2), porém, com o circuito de refrigeração em sistema indireto fechado, por exemplo, em *Chillers* com um sistema de água gelada, instalados em uma área isolada e com acesso restrito, entre outros requisitos da norma.

A aplicação de sistemas indiretos fechados com água gelada (ou outros fluidos secundários para aplicações de baixa temperatura) diminui o nível de risco e permite a sua aplicação em todos os tipos de ocupação.

6.1.3 REQUISITOS PARA AS INSTALAÇÕES DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

A sessão 8 da ***ABNT NBR 16069:2010*** ainda aborda os aspectos das instalações do sistema de refrigeração incluindo tubulação, instalações civis e elétricas, e em especial os requisitos para a sala de máquinas, incluindo sistemas de ventilação e exaustão, detectores de vazamento de fluido refrigerante, portas de acesso e evacuação e interação outros equipamentos tais como compressores de ar, motores a diesel ou a gás.

É importante observar que a instalação de detectores de vazamento é requerida em salas de máquinas de sistemas de refrigeração, seja qual for o fluido refrigerante, exceto R-718 (água).

Em salas de máquinas fechadas é ainda requerida a instalação de sistemas de ventilação e exaustão mecânica de emergência, acionada para dissipação do fluido refrigerante em caso de vazamento. O cálculo da vazão de ar de exaustão é dado pela seguinte equação:

$$V_{Ar\ Exaustão} = 70 \cdot G^{0.5}$$

Onde:

- $V_{Ar\ Exaustão}$ – Vazão mínima de ar requerida (L/s).
- **G** – Carga total de fluido refrigerante no sistema (kg).

A descarga do ar contaminado para o ar exterior deve ser direcionada para um local seguro, longe de locais de circulação de pessoas.

6.1.4 PROJETO DE EQUIPAMENTOS E SISTEMAS

A sessão 9 trata do projeto e construção quanto à segurança dos sistemas de refrigeração e seus equipamentos. Os vasos de pressão devem ser projetados e construídos de acordo com a versão vigente do ***ASME Pressure Vessel Code, Section VIII Division 1***. Os trocadores do tipo "*Shell & Tube*", separadores de líquido, separadores de óleo e recipientes de líquido de um *Chiller* são exemplos de vasos de pressão.

O projeto da tubulação deve ser conforme a versão vigente do ***ANSI/ASME Standard B31.5 – Refrigeration Piping and Heat Transfer Components***.

Normas internacionais reconhecidas e equivalentes também poderão ser utilizadas.

Na ***ABNT NBR 13598:2011 – Vasos de Pressão para Refrigeração***, são estabelecidas as pressões mínimas de projeto requeridas para o dimensionamento dos componentes do sistema de refrigeração em função do fluido refrigerante, do nível de pressão (se aplicados no lado de baixa ou de alta pressão) e do tipo de condensação (a água ou a ar). A Tabela 20 mostra os valores mínimos de pressão de projeto para alguns fluidos refrigerantes.

Tabela 20 – Pressões mínimas de projeto para componentes do sistema de refrigeração, em função do fluido refrigerante, conforme a ***ABNT NBR 16069:2010***

		Pressão Mínima de Projeto (kPa abs)					
		Lado de Baixa Pressão		Lado de Alta Pressão			
		Local Coberto	Local Ao Sol	Local Ao Sol	Cond. a Ar T_{BSmax} < 38 °C	Cond. a Ar T_{BSmax} < 43 °C	Cond. a Ar T_{BSmax} < 55 °C
Ponto de Ebulição		35 °C	43 °C	47 °C	59 °C	63 °C	67 °C
Fluido Refrigerante	R-12	847	1.029	1.130	1.475	1.605	1.742
	R-502	1.474	1.779	1.947	2.519	2.731	2.956
	R-22	1.348	1.635	1.793	2.333	2.535	2.749
	R-123	132	172	195	279	313	350
	R-32	2.194	2.670	2.934	3.843	4.187	4.552
	R-134a	888	1.100	1.220	1.634	1.792	1.961
	R-152a	797	989	1.097	1.475	1.620	1.776
	R-404A	1.622	1.965	2.154	2.799	3.041	3.297
	R-407C	1.547	1.881	2.066	2.699	2.937	3.189
	R-408A	1.509	1.827	2.003	2.602	2.827	3.065
	R-410A	2.158	2.622	2.880	3.760	4.092	4.444
	R-417A	1.282	1.563	1.718	2.251	2.451	2.664
	R-438A	1.451	1.764	1.937	2.529	2.752	2.987
	R-507	1.650	2.003	2.199	2.870	3.124	3.393
	R-1234yf	897	1.101	1.215	1.607	1.756	1.914
	R-1234ze	669	833	926	1.250	1.374	1.508
	R-444B	1.591	1.928	2.114	2.747	2.984	3.236
	R-290	1.223	1.472	1.609	2.073	2.246	2.430
	R-600	330	413	460	625	689	758
	R-1270	1.475	1.766	1.927	2.467	2.668	2.888
	R-717	1.351	1.687	1.877	2.541	2.795	3.069

Fonte: Elaboração do autor.

Nota:

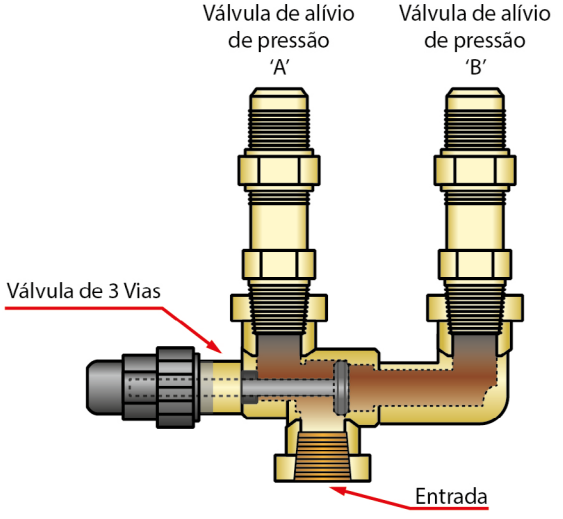
- Pressão equivalente (kPA abs) no ponto de ebulição (*bubble point*) de referência;
- Os valores se referem às pressões mínimas de projeto requeridas. Outros fatores de projeto e condições de operação deverão ser considerados para a definição da pressão de projeto efetiva dos componentes do sistema de refrigeração;
- Os valores de pressão em função do ponto de ebulição podem diferir entre os diferentes fabricantes de fluidos refrigerantes.

6.1.5 DISPOSITIVOS DE ALÍVIO DE PRESSÃO

Um dos principais componentes sobre a segurança em vasos de pressão e compressores é o dispositivo de alívio de pressão. Os dispositivos de alívio de pressão mais utilizados em *Chillers* são as válvulas de alívio de pressão (também chamadas de válvulas de segurança). Discos de ruptura são aplicados em *Chillers* que utilizam fluidos refrigerantes de baixa pressão (R-11, R-123, R-1233zd) e plugues fusíveis podem ser aplicados em *Chillers* de pequeno porte, em trocadores de calor com volume interno menor que 85 L.

As Figuras 48, 49 e 50 mostram alguns exemplos de dispositivos de alívio de pressão.

Figura 48 – Válvula de alívio de pressão dupla com válvula de 3 Vias acoplada



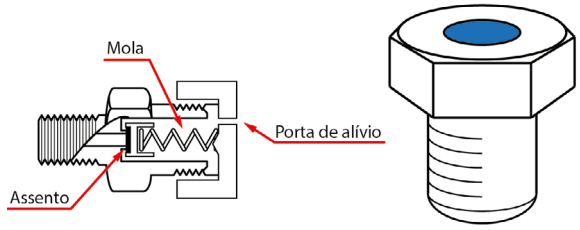
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 49 – Disco de ruptura



Fonte: BS&B Safety Systems.

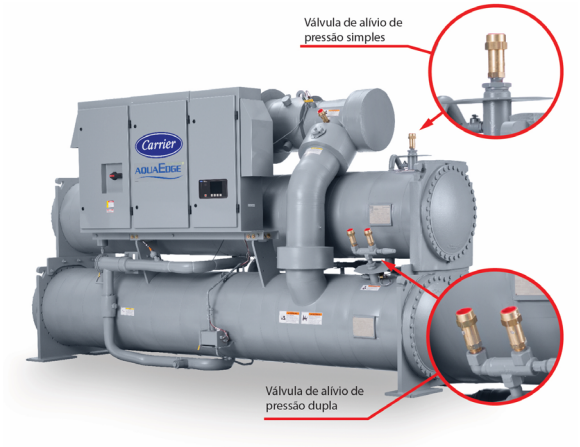
Figura 50 – Plugue fusível



Fonte: Elaboração do autor.

A Figura 51 mostra as válvulas de alívio de pressão típicas dos trocadores de calor de um *Chiller* com condensação a água.

Figura 51 – Válvulas de alívio de pressão dos trocadores de calor de um *Chiller*



Fonte: Midea Carrier do Brasil Ltda.

A seguir alguns requisitos para a instalação na aplicação de dispositivos de alívio de pressão:

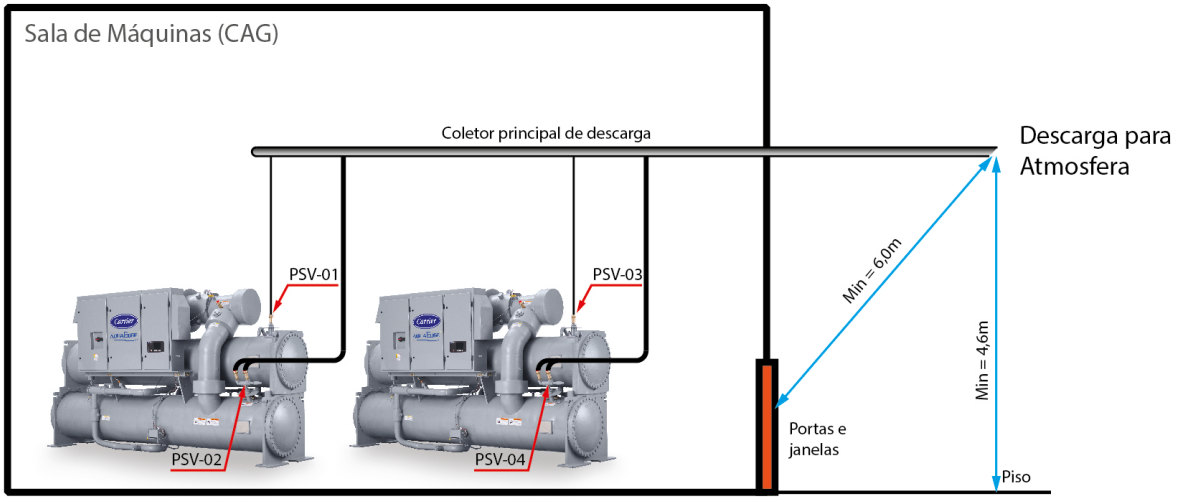
- Os dispositivos de alívio de pressão devem ser do tipo de atuação direta por pressão ou operados por válvula piloto;
- Nenhuma válvula ou dispositivo de bloqueio de fluxo deve ser instalado entre o dispositivo de alívio de pressão e as partes do sistema protegidas. A válvula de três vias utilizada em associação com uma válvula de alívio de pressão dupla, não é considerada como válvula de bloqueio;
- As válvulas de alívio de pressão devem ser ajustadas e seladas pelo fabricante. Cada válvula de alívio de pressão deve ter uma identificação individual, relacionando-a ao prontuário do vaso de pressão, de acordo com a ***NR-13***;
- Deve ser fornecido pelo fabricante do dispositivo um certificado de calibração, relativo ao dispositivo de segurança contendo, as informações referentes ao dimensionamento do dispositivo (modelo, pressão, vazão, diâmetro, etc.);
- Os vasos de pressão com volume interno bruto de 285 L ou superior e quando houver a descarga para a atmosfera, devem utilizar um ou mais elementos de ruptura ou válvulas de alívio de pressão duplas. As válvulas de alívio de pressão duplas devem ser instaladas com válvulas de três vias para permitir a calibração e a manutenção;
- Válvulas de alívio de pressão simples podem ser instaladas nos vasos do lado de baixa pressão (sem válvula de bloqueio entre o vaso e a válvula de alívio de pressão) quando houver meios para recolhimento de toda carga de fluido refrigerante do vaso para o lado de alta pressão, de modo a permitir a calibração e a manutenção da válvula de maneira segura e sem perda de fluido. Porém o mais recomendado é instalar válvulas de alívio de pressão duplas;
- Para vasos com volume interno menor que 285 L, há a opção de utilização de válvula de alívio de pressão simples ou plugue fusível, para vasos com volume interno menor que 85 L;
- Os dispositivos de alívio de pressão em qualquer sistema contendo fluido refrigerante dos grupos A3 e B3, ou em qualquer sistema contendo mais de 3 kg de fluido refrigerante dos grupos A2, B1, B2 ou ainda, em qualquer sistema contendo mais de 50 kg de fluido refrigerante do grupo A1, devem descarregar para a atmosfera em um local acima de 4,6 m do nível do solo ou piso adjacente e a uma distância superior a 6 m de qualquer porta, janela, abertura de ventilação ou saída de edifício. Este é um detalhe muito importante no projeto das salas de máquinas dos equipamentos, mas normalmente negligenciado;
- A descarga deve ser instalada de forma a evitar que o fluido refrigerante descarregado incida sobre pessoas nas proximidades e que materiais estranhos ou detritos entrem na tubulação de descarga;
- O tubo conectado do lado de descarga de um dispositivo de alívio de pressão deve ser dotado de meios para evitar o seu entupimento;
- O diâmetro do tubo de descarga de um dispositivo de alívio de pressão ou plugue fusível não deve ser inferior ao diâmetro de saída do dispositivo de pressão ou do plugue fusível;
- Quando as saídas de dois ou mais dispositivos de alívio de pressão forem conectadas a um coletor principal de descarga, o diâmetro da tubulação do coletor deverá ser calculado considerando a somatória das vazões de descarga dos vários dispositivos de alívio de pressão. Considera-se a atuação simultânea, pois os dispositivos de alívio de pressão são dimensionados para uma condição típica de incêndio na área onde estão instalados os componentes do sistema de refrigeração.

A Figura 52 mostra o arranjo típico do encaminhamento da tubulação de descarga para a atmosfera das válvulas de alívio de pressão dos *Chillers* de uma central de água gelada.

O comprimento máximo da tubulação de descarga instalada na saída dos dispositivos de alívio de pressão e plugues fusíveis descarregando na atmosfera deve ser determinado pelo método de cálculo descrito no anexo A da ***ABNT NBR 16069:2010***.

O valor de projeto da contrapressão da linha, devido ao fluxo na tubulação de descarga na saída dos dispositivos de alívio de pressão e dos plugues fusíveis, descarregando para a atmosfera, será limitada pelo comprimento equivalente permissível da tubulação determinado pela equação ao lado.

Figura 52 – Encaminhamento da tubulação de descarga para a atmosfera das válvulas de alívio de pressão dos *Chillers* de uma central de água gelada



Fonte: Elaboração do autor com foto dos equipamentos de cortesia de Midea Carrier do Brasil Ltda.

$$L = \frac{7{,}4381 \cdot 10^{-15} \cdot d^5 \cdot (P_0^2 - P_2^2)}{f \cdot C_r^2} - \frac{d}{500 \cdot f} \cdot \ln\left(\frac{P_0}{P_2}\right)$$

Onde:

- L – Comprimento equivalente da tubulação de descarga (m).
- C_r – Capacidade indicada no dispositivo de alívio (kg/s).
- *f* – Fator de fricção de *Moody* para fluxo inteiramente turbulento, onde alguns valores estão na Tabela 21.
- d – Diâmetro interno da tubulação (mm).
- P_2 – Pressão absoluta na saída da tubulação de descarga (kPa).
- P_0 – Contrapressão da linha admissível (absoluta) no dispositivo de alívio (kPa).

Para a contrapressão da linha admissível (P_0), utilizar uma porcentagem do valor da pressão de ajuste especificada pelo fabricante (P_{Set}). Quando a contrapressão da linha admissível não for especificada, utilizar os seguintes valores:

- Para válvulas de alívio de pressão convencionais, 15 % da pressão de ajuste:

  P0 = (0,15 P_{Set}) + Pressão atmosférica local

- Para válvulas de alívio de pressão balanceadas, 25 % da pressão de ajuste:

  P0 = (0,25 P_{Set}) + Pressão atmosférica local

- Para discos de ruptura, plugues fusíveis e válvulas de alívio de pressão com piloto, 50% da pressão de ajuste:

  P0 = (0,50 P_{Set}) + Pressão atmosférica local

Tabela 21 – Valores típicos para o fator de fricção de *Moody* para fluxos inteiramente turbulentos

Tubos de Cobre conforme ASTM B280			Tubos de Aço padrão SCH 40		
OD	DI	f	OD	DI	f
(in)	(mm)		(in)	(mm)	
3/8	8,00	0,0136	1/2	15,80	0,0259
1/2	10,92	0,0128	3/4	20,93	0,0240
5/8	13,84	0,0122	1	26,64	0,0225
3/4	16,92	0,0117	1.1/4	35,05	0,0209
7/8	19,94	0,0114	1.1/2	40,89	0,0202
1.1/8	26,04	0,0108	2	52,50	0,0190
1.3/8	32,13	0,0104	2.1/2	62,71	0,0182
1.5/8	38,23	0,0101	3	77,93	0,0173
			4	102,26	0,0163
			5	128,19	0,0115
			6	154,05	0,0149

Fonte: Elaboração do autor.

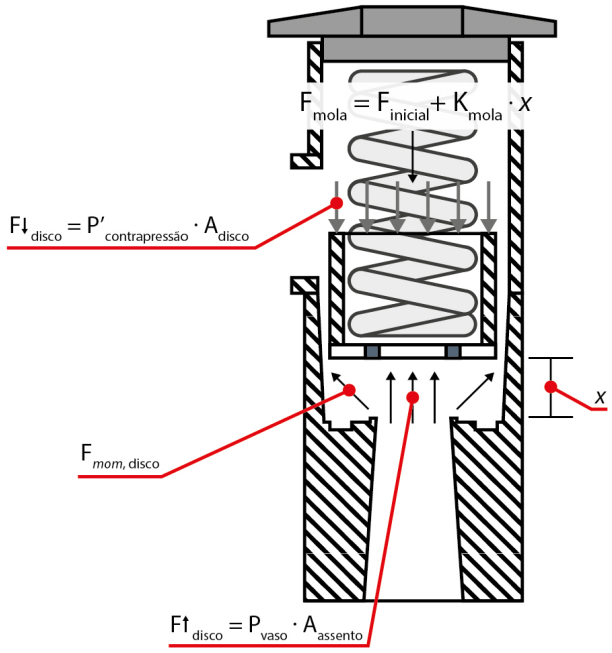
6.1.6 CONTRA PRESSÃO NA DESCARGA DOS DISPOSITIVOS DE ALÍVIO DE PRESSÃO

Na tubulação de descarga dos dispositivos de alívio de pressão, ocorre o efeito da chamada contrapressão (do inglês *Back Pressure*). Existem dois tipos de contrapressão que devem ser considerados:

1) **Contrapressão superimpost**a (do termo em inglês *Superimposed Back Pressure*) refere-se à pressão externa exercida sobre o disco da válvula de alívio quando esta está parada (estado estático). Para a maioria dos sistemas de refrigeração aplicados a ar condicionado, incluindo os *Chillers*, a descarga final dos dispositivos de alívio de pressão é para a atmosfera, portanto, a contrapressão superimposta é a pressão atmosférica. Quando houver a descarga para um tanque com água (a tubulação deve ser mergulhada no tanque) ou outro tipo de recipiente pressurizado, a contrapressão superimposta será equivalente à pressão exercida pela coluna de água ou pela pressão do recipiente, que será superior à pressão atmosférica. A Figura 53 mostra um detalhe das forças que atuam no interior de uma válvula de alívio de pressão no estado estático (válvula fechada).

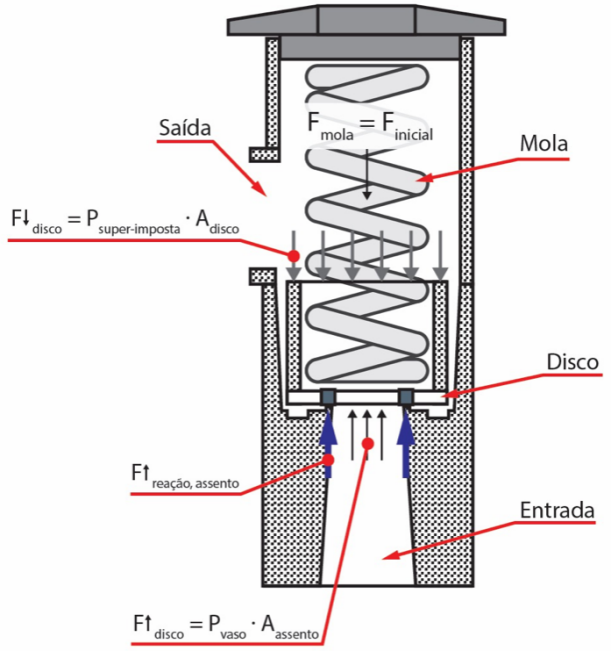
2) **Contrapressão da linha** (do termo em inglês *Built-up Back Pressure*), que se refere à pressão externa exercida sobre o disco da válvula de alívio de pressão criada após a abertura da válvula (estado dinâmico), devido à resistência de toda linha de descarga para a vazão que flui da válvula, isto é, se a pressão no ponto final de descarga é a pressão atmosférica (em caso de descarga para a atmosfera) e em todo trecho da tubulação de descarga há uma perda de pressão, então a pressão na saída da válvula será superior à pressão atmosférica, mais próxima da pressão de abertura da válvula de alívio de pressão. A Figura 54 mostra um detalhe das forças que atuam no

Figura 53 – Válvula de alívio de pressão no estado estático – Contrapressão superimposta



Fonte: REINDL & JEKEL, 2006.

Figura 54 – Válvula de alívio de pressão no estado dinâmico – Contrapressão da linha



Fonte: REINDL & JEKEL, 2006.

interior de uma válvula de alívio de pressão no estado dinâmico (após a abertura da válvula).

É muito importante observar que a pressão nas linhas de descarga dos dispositivos de alívio de pressão é elevada. Portanto, recomenda-se utilizar o mesmo material da tubulação do sistema de refrigeração na tubulação de descarga dos dispositivos de alívio de pressão, com os mesmos critérios de dimensionamento e montagem. PVC e outros materiais ou mesmo tubulação de aço com pressão máxima de trabalho admissível menor que a pressão de projeto da tubulação do sistema não devem ser utilizados.

6.2 NR-13

Conforme a **NR-13**, os vasos de pressão devem ser dotados dos seguintes itens:

- Válvula ou outro dispositivo de alívio de pressão (válvula de segurança) com pressão de abertura ajustada em valor igual ou inferior à PMTA (Pressão Máxima de Trabalho Admissível), instalado diretamente no vaso ou no sistema que o inclui, considerados os requisitos do código de projeto relativos a aberturas escalonadas e tolerâncias de calibração;
- Meios utilizados contra o bloqueio inadvertido de dispositivo de segurança quando este não estiver instalado diretamente no vaso;
- Instrumento que indique a pressão de operação, instalado diretamente no vaso ou no sistema que o contenha.

Todo vaso de pressão deve ter afixado em seu corpo, em local de fácil acesso e bem visível, placa de identificação indelével com, no mínimo, as seguintes informações:

- Fabricante;
- Número de identificação;
- Ano de fabricação;
- Pressão máxima de trabalho admissível – PMTA;
- Pressão de teste de fabricação;
- Código de projeto e ano de edição.

Além da placa de identificação, deve constar, em local visível, a categoria do vaso e seu número ou código de identificação.

Todo vaso de pressão deve possuir a seguinte documentação devidamente atualizada, no estabelecimento onde estiver instalado:

- Prontuário do vaso de pressão a ser fornecido pelo fabricante;
- Registro de Segurança;
- Projeto de Instalação;
- Projeto de alteração ou reparo, quando aplicável;
- Relatórios de inspeção;
- Certificados de calibração dos dispositivos de alívio de pressão, onde aplicável.

As válvulas de alívio de pressão dos vasos de pressão devem ser desmontadas, inspecionadas e calibradas com prazo adequado à sua manutenção, porém, não superior ao previsto para a inspeção de segurança periódica interna dos vasos de pressão por elas protegidos. A Tabela 22 apresenta os prazos máximos para inspeção de segurança periódica.

Tabela 22 – Intervalo máximo para inspeções de seguranças periódicas, conforme a ***NR-13***

Categoria do Vaso	Exame Externo	Exame Interno
I	1 ano	3 anos
II	2 anos	4 anos
III	3 anos	6 anos
IV	4 anos	8 anos
V	5 anos	10 anos

Fonte: Elaboração do autor.

Os vasos de pressão com temperatura de operação inferior a 0 ºC e que operem em condições nas quais a experiência mostre que não ocorre deterioração devem ser submetidos a exame interno a cada 20 anos e exame externo a cada dois anos.

A Tabela 23 define as categorias dos vasos de pressão em função do produto "P.V" e da classe do fluido.

Nota:

- P – Máxima pressão de operação do vaso de pressão (MPa);
- V – Volume geométrico interno do vaso de pressão (m3);
- Amônia e Hidrocarbonetos são fluidos de classe A;
- A maioria dos fluidos halogenados são fluidos de classe C.

A ***NR-13*** deve ser aplicada a qualquer vaso cujo produto "P.V" seja superior a 8,0. Porém, diferente da grandeza de pressão para a definição da categoria do vaso (em MPa) , a máxima pressão de operação neste cálculo é expressa em kPa e volume geométrico interno em m^3. A seguir, algumas observações:

- Aplicável para fluidos das classes "A" (conforme Anexo IV), independente do diâmetro do vaso ou do produto "P.V";
- Não aplicável para vasos com diâmetros menores que 150 mm para fluidos das classes "B", "C" e "D".

Há ainda uma ressalva no texto da ***NR-13*** informando que "esta norma não se aplica a vasos de pressão que façam parte integrante de pacote de máquinas de fluido rotativas ou alternativas".

Esta ressalva pode trazer dúvidas sobre a aplicação da ***NR-13*** para vasos de pressão e trocadores de calor montados em unidades compressoras, unidades condensadoras, *Chillers* ou outros equipamentos montados em *skid*.

Porém, o Manual Técnico sobre a ***NR-13*** emitido pelo próprio MTB esclarece:

A ***NR-13*** não se aplica a vasos intimamente ligados a equipamentos rotativos ou alternativos, pois além dos esforços de pressão, estes equipamentos estão sujeitos a esforços dinâmicos que poderão provocar fadiga, corrosão, etc. Entende-se, portanto, que tais vasos sejam cobertos por normas específicas mais rigorosas que a ***NR-13***. São exemplos dessa situação:

- Cárter de motores a combustão;
- Volutas de bombas;
- Cilindros hidráulicos;
- Carcaças de bombas e compressores.

Tabela 23 – Categorias dos vasos de pressão, conforme a ***NR-13***

Classe de Fluído	Grupo de Potencial de Risco				
	1 P.V ≥ 100	2 P.V <100 P.V ≥ 30	3 P.V < 30 P.V ≥ 2,5	4 P.V < 2,5 P.V ≥ 1	5 P.V < 1
	Categorias do Vaso de Pressão				
A ▸ Líquido inflamável, combustível - T ≥ 200 °C ▸ Tóxico com Limite de Tolerância ≤ 20 ppm ▸ Hidrogênio ▸ Acetileno	I	I	II	III	III
B ▸ Combustível - T ≤ 200 °C ▸ Tóxico com Limite de Tolerância > 20 ppm	I	II	III	IV	IV
C ▸ Vapor de água ▸ Gases asfixiantes simples ▸ Ar comprimido	I	II	III	IV	V
D Água ou outros fluidos não enquadrados nas classes A, B ou C com T > 50 °C	II	III	IV	V	V

Fonte: Elaboração do autor.

Vasos de pressão instalados em pacotes com objetivo único de redução de espaço físico ou facilidade de instalação não são considerados como integrantes de máquinas e, portanto, estão sujeitos aos requisitos da ***NR-13*** quando o produto P.V > 8 ou com fluido classe A.

Em outro documento oficial da Secretaria de Inspeção do Trabalho do TEM (Ministério do Trabalho e Emprego), em uma sessão de perguntas e respostas sobre a **NR-13**, é declarado que os vasos de pressão de um sistema de refrigeração incluindo trocadores de calor *Shell & Tube*, separadores de óleo, separadores de líquido, recipientes de líquido montados em *Chillers*, unidades compressoras e unidades condensadoras, se enquadram na ***NR-13***.

A seguir, alguns exemplos de cálculo da categoria de alguns vasos de pressão:

1) **Fluido refrigerante: R-717 (Amônia) – Lado de baixa pressão – Local coberto**

   ▹ Pressão de projeto: 1.351 kPa abs (ver Tabela 20 do item 6.1.4);

   ▹ PMTA = 12,5 bar g = 1,25 MPa g;

- Volume interno do vaso: 773 L = 0,773 m³;
- Tolerância Limite: 20 ppm (NR-15) → Classe de Fluido: **A**;
- P.V = 1,25 x 0,77 = 0,97 < 1,00 → **CATEGORIA III** (ver Tabela 23).

2) **Fluido refrigerante: R-717 – Lado de alta pressão – Condensação a água**

- Pressão de projeto: 1.877 kPa abs (ver Tabela 20 do item 6.1.4);
- PMTA = 17,8 bar g = 1,78 MPa g;
- Volume do Vaso: 1.507 L = 1,51 m³;
- Tolerância Limite: 20 ppm (NR-15) → Classe de Fluido: **A**;
- P.V = 1,78 x 1,51 = 2,68 > 2,50 → **CATEGORIA II** (ver Tabela 23).

3) **Fluido refrigerante: R-134a – Lado de alta pressão – Condensação a água**

- Pressão de projeto: 1.220 kPa abs (ver Tabela 20 do item 6.1.4);
- PMTA = 11,2 bar g = 1,12 MPa g;
- Volume do Vaso: 1.370 L = 1,37 m³;
- Gás asfixiante (NR-15) → Classe de Fluido: **C**;
- P.V = 1,12 x 1,37 = 1,53 < 2,50 → **CATEGORIA IV** (ver Tabela 23).

4) **Fluido refrigerante: R-410A – Lado de alta pressão – Condensação a água**

- Pressão de projeto: 2.880 kPa abs (ver Tabela 20 do item 6.1.4);
- PMTA = 28,8 bar g = 2,88 MPa g;
- Volume do Vaso: 1.789 L = 1,79 m³;
- Gás asfixiante (NR-15) → Classe de Fluido: **C**;
- P.V = 2,88 x 1,79 = 5,15 > 2,50 → **CATEGORIA III** (ver Tabela 23).

5) **Fluido refrigerante: R-410A – Lado de alta pressão – Condensação a ar – São Paulo ($T_{BS\ max}$ < 38 °C)**

- Pressão de projeto: 3.760 kPa abs (ver Tabela 20 do item 6.1.4);
- PMTA = 37,6 bar g = 3,76 MPa g;
- Volume do Vaso: 469 L = 0,47 m³;
- Gás asfixiante (NR-15) → Classe de Fluido: **C**;
- P.V = 2,88 x 1,79 = 1,76 < 2,50 → **CATEGORIA IV** (ver Tabela 23).

6.3 DESTINAÇÃO ADEQUADA DE FLUIDOS REGRIFERANTES

A liberação voluntária da carga de fluido refrigerante de um sistema de refrigeração para a atmosfera é considerada pela legislação brasileira um crime ambiental. Além disso, pode ser considerado um desperdício, pois o fluido refrigerante pode ser recuperado e reutilizado. Ou seja, o usuário do sistema pode vender a carga de fluido refrigerante (com preço médio no mercado de R$ 1,00/kg) e a empresa de manutenção, após a recuperação pode reutilizar a carga ao invés de adquirir uma nova.

No entanto, a empresa responsável pelo recolhimento do fluido refrigerante deve estar registrada no Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras (CTF/APP) do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), conforme determina a Instrução Normativa IBAMA nº 37, de 29 de junho de 2004, e possuir equipamentos adequados para o recolhimento e recuperação. É necessário que o usuário do sistema de refrigeração exija empresas com certificado de regularidade do CTF/APP válido toda vez que houver serviços de manutenção que envolvam a retirada da carga de fluido refrigerante do sistema. É necessário ainda que a empresa proprietária do sistema de refrigeração e da carga de fluido refrigerante retirada emita um manifesto de destinação de resíduos, conforme estabelecido pela legislação local.

A atividade de campo *in loco* para a recuperação da carga do fluido refrigerante de um sistema de refrigeração consiste apenas da transferência do fluido refrigerante do sistema para um cilindro de serviço. Não se deve fazer nenhum serviço de limpeza ou recuperação em campo de modo a evitar a dispersão parcial para a atmosfera.

Toda atividade de recuperação (incluindo a limpeza adequada) deve ser realizada em máquinas recuperadoras, disponíveis no mercado nacional, ou poderá ser feito por meio dos centros de coleta e reciclagem que estão distribuídos em algumas cidades do país.

Para a recuperação dos fluidos refrigerantes, é necessário remover alguns produtos contaminantes

que entraram no sistema e se misturaram com o fluido refrigerante, tais como: água (umidade), óleo inadequado, óleo contaminado que reagem com o fluido refrigerante e a umidade gerando ácidos oleicos (ácidos graxos) e ácidos clorídricos. Somente após um processo de destilação, este produto poderá ser reutilizado. Caso o fluido contaminado não possa ser recuperado ou não haja interesse comercial na sua reutilização, deverá ser encaminhado para o processo de incineração, conforme requisitos definidos na Resolução CONAMA 316, de 29 de outubro de 2002, ou por legislação estadual ou municipal, quando houver.

É fundamental que no processo de recolhimento não haja mistura de fluidos diferentes no mesmo cilindro e que o cilindro de serviço seja exclusivo para aquele determinado fluido refrigerante. Após o recolhimento, o cilindro de serviço deve ser cuidadosamente identificado como um recipiente com fluido refrigerante contaminado. Da mesma forma, um cilindro com o fluido refrigerante recuperado também deve ser devidamente identificado.

A conservação dos fluídos refrigerantes hoje é uma das grandes preocupações mundiais na questão da preservação do planeta, por isso, muitos dos aspectos de projeto deste manual enfatizam a redução da carga térmica (o que irá requerer menor carga de fluido refrigerante nos sistemas de refrigeração) e a aplicação de sistemas com cargas reduzidas de fluido refrigerante, principalmente os *Chillers*. Mas, é essencial que haja um programa de operação e manutenção dos equipamentos de um sistema de refrigeração com o gerenciamento e monitoramento da reposição da carga de fluido refrigerante, o que indica eventuais vazamentos. Para isso, recomenda-se a contratação de profissionais qualificados na equipe de manutenção e a solicitação de certificados das empresas fornecedoras de serviços sobre a retirada de qualquer carga de fluido refrigerante dos sistemas de refrigeração.



7 GLOSSÁRIO

- ***Approach* –** a melhor tradução do inglês seria aproximação. No evaporador de um *Chiller*, o *approach* indica o diferencial entre a temperatura de saída de água gelada e a temperatura de evaporação do fluido refrigerante. No condensador, indica o diferencial entre a temperatura de condensação do fluido refrigerante e a temperatura de saída de água de resfriamento. O *approach* pode ser aplicado para qualquer trocador de calor incluindo torres de resfriamento e condicionadores de ar. Ver item 6.2 do Volume I e item 5.2 do Volume II.
- **BAC –** sigla para bomba do circuito de água de resfriamento que atende um *Chiller* com condensação a água e sua respectiva torre de resfriamento de um sistema de água gelada. Ver itens 6.4 e 6.5 do Volume I.
- **BAGM –** sigla para bomba do circuito principal de água gelada dimensionada para atender aos equipamentos usuários em série com os *Chillers* em um sistema de água gelada do tipo circuito único com vazão de água gelada variável. Ver item 8.5 do Volume I.
- **BAGP –** sigla para bomba do circuito primário de água gelada que atende um *Chiller* de um sistema de água gelada com circuito primário e secundário de água gelada. Ver item 8.3 do Volume I.
- **BAGS –** sigla para bomba do circuito secundário de água gelada que atende os equipamentos usuários (condicionadores de ar e demais trocadores de calor) de um sistema de água gelada com circuito primário e secundário de água gelada. Ver item 8.3 do Volume I.
- **BAGX –** sigla para bomba auxiliar para garantir a vazão mínima de água gelada requerida em um ou mais *Chillers* de um sistema de água gelada do tipo circuito único com vazão de água gelada variável. Ver item 8.5 do Volume I.
- ***Blends* –** termo em inglês que significa misturas. São misturas de dois ou mais fluidos refrigerantes que tem como o objetivo melhorar algumas das características dos componentes que eventualmente pudessem limitar o seu uso em determinadas aplicações. Dentre as características a serem melhoradas, as principais são: níveis de toxicidade, índices de inflamabilidade, COP do ciclo, pressões de operação, ODP, GWP e miscibilidade com o óleo lubrificante. Muitos *blends* foram desenvolvidos como fluidos de *drop-in*, ou seja, fluidos com características operacionais similares (mesma faixa de operação e índices de COP) que podem ser utilizados para substituição direta de um fluido que deve ser eliminado (CFC, HCFC ou HFC) de um sistema de refrigeração existente, mas que não exija grandes intervenções ou adequações nos equipamentos e seus componentes. Normalmente envolve apenas a troca do óleo lubrificante e elementos de vedação. Os *blends* podem ser misturas zeotrópicas ou azeotrópicas. Ver itens 4.1.1 e 4.2.2 e Figura 33 do Volume I.
- ***Blends* Azeotrópicos –** são misturas de fluidos refrigerantes que se comportam como substância pura durante os processos de mudança de fase (evaporação ou condensação). A principal característica é a temperatura constante durante o processo de mudança de fase à pressão constante. Ver itens 4.1.1 e 4.2.2 e Figura 33 do Volume I.
- ***Blends* Zeotrópicos –** são misturas de fluidos refrigerantes que não se comportam como substância pura durante os processos de mudança de fase (evaporação ou condensação). No processo de evaporação, a temperatura inicial (ponto de ebulição) de cada um dos componentes da mistura será em função da pressão parcial de vapor de cada componente (resultante da fração molar). Assim, durante o processo de evaporação há uma variação de temperatura – chamada de *glide* – que é a diferença de temperatura entre o final da evaporação (ponto de orvalho) do último componente da mistura a evaporar e o início da evaporação (ponto de ebulição) do primeiro componente da mistura a evaporar. No final do processo, para a evaporação completa do último componente da mistura é necessário que os demais componentes já estejam na fase de vapor superaquecido. No processo de condensação o comportamento é o inverso. Ver itens 4.1.1 e 4.2.2 e Figura 33 do Volume I.
- **BMS ou BAS –** siglas do inglês para *Building Management System* ou *Building Automation System*,

refere-se ao sistema de automação predial ou o sistema de supervisão predial incluindo o sistema de automação que controla e monitora a operação de um sistema de ar condicionado.

- **BoD –** sigla do inglês para *Bases of Design* – Bases do Projeto – documento da equipe de projeto que reflete o OPR e tem como objetivo atender e cumprir os itens descritos no documento de OPR previamente elaborado, incluindo os requisitos, as necessidades, limitações, diretrizes e mesmo os desejos do cliente para os vários aspectos relevantes do projeto. Ver item 3.2.1 do Volume II.
- ***Brine* –** termo em inglês que significa salmoura. Fluido secundário alternativo à água gelada, utilizado normalmente em sistemas com temperatura de saída do *Chiller* muito próximas ou abaixo de 0.0ºC. Os *brines* podem ser do tipo substâncias puras (óleos sintéticos) ou soluções aquosas. No passado, os *brines* eram realmente salmouras, misturas que utilizavam água e cloreto de sódio ou cloreto de cálcio, mas por serem muitos corrosivos não são mais utilizados. Os *brines* mais comuns em sistemas de água gelada são soluções aquosas com etileno glicol, propileno glicol, etanol, formato de potássio ou acetato de potássio.
- ***Bubble point* –** termo em inglês que significa ponto de ebulição. Durante o processo de aquecimento de um determinado fluido refrigerante (ou um *blend*) na fase líquida, à pressão constante, é a temperatura na qual surge a primeira bolha de vapor. É o ponto inicial do processo de evaporação do fluido refrigerante. Ver itens 4.1.1 e 4.2.2 e Figura 33 do Volume I.
- **CAG –** sigla para Central de Água Gelada. Sala de máquinas principal de um sistema de água gelada onde estão instalados os *Chillers*, bombas e painéis elétricos dos equipamentos. Em sistemas com condensação a água, as torres de resfriamento são instaladas em área ao ar livre adjacente ou remota. Em sistemas com condensação a ar, normalmente a CAG é locada em área ao ar livre.
- **Caixa de VAC –** caixa de volume de ar constante ou sem controle de vazão, apenas com função On/Off, ou seja 100% aberta ou totalmente fechada (0%). Instalada em uma rede de dutos para distribuição de ar em um ambiente ou zona térmica que não possua controle de temperatura. Trata-se de uma alternativa mais barata, mas que normalmente resulta em desconforto para os usuários da zona térmica atendida. Ver item 4.1.5 do Volume III.
- **Caixa de VAV –** caixa de volume de ar variável, ou com controle contínuo de vazão de ar instalada em uma rede de dutos para distribuição de ar controlada aos elementos de difusão de um ambiente ou uma determinada zona térmica. O controle de vazão de ar na caixa de VAV é realizado por um sensor de temperatura do ar ambiente instalado na zona térmica atendida. Ver item 4.1.5 do Volume III.
- **CFR –** documento com os requisitos atuais do sistema (do inglês *Current Facility Requirements*) – é um dos principais documentos de todo o processo de retrocomissionamento, onde todos os requisitos atuais do sistema são estabelecidos. Ver item 3.1.1 do Volume III.
- **clo –** unidade de medida no SI para o **índice de vestimenta** de uma pessoa e relaciona a resistência térmica média à troca de calor do corpo humano com o ambiente, causada pela vestimenta do usuário – 1 clo = 0,155 m²K/W. Ver item 1.2.1 do Volume II.
- **COP –** sigla do inglês para *Coefficient Of Performance* – coeficiente de desempenho. O COP de um *Chiller* com ciclo de compressão de vapor, em termos práticos é a relação entre a capacidade de resfriamento do *Chiller* e a potência absorvida pelos motores dos seus componentes. Nos *Chillers* com ciclo de absorção, a equação do COP indica a relação entre a capacidade de resfriamento e a potência (calor) de geração somada à potência de bombeamento da solução. Ver item 5.1 do Volume I.
- **Cx –** sigla para o termo comissionamento. Ver item 3.0 do Volume II.
- ***Demister* –** é um dispositivo instalado em um separador de líquido (por exemplo, de um evaporador de um *Chiller*) para aumentar a remoção de gotículas de líquido arrastadas (ou a retenção de gotículas de líquido) em um fluxo de vapor. Pode ser uma malha com elemento coalescente ou qualquer outra estrutura destinada a agregar a névoa em gotículas e garantir separação do fluxo de vapor. Nos separadores de líquido dos evaporadores dos *Chillers*, a função principal do

demister é evitar o arraste de líquido refrigerante para a sucção do compressor. A aplicação do *demister* reduz o tamanho do separador de líquido. Ver item 4.1.1 do Volume I – Figuras 19 e 20.

- ***Dew point* –** termo em inglês que significa ponto de orvalho. Durante o processo de resfriamento de um determinado fluido refrigerante (ou um *blend*) na fase de vapor superaquecido, à pressão constante, é a temperatura na qual surge a primeira bolha de líquido. É o ponto inicial do processo de condensação do fluido refrigerante. Ver itens 4.1.1 e 4.2.2 e Figura 33 do Volume I.
- ***Economizer* ou Economizador –** é um componente adicional aplicado ao ciclo para aumentar a capacidade de um sistema de refrigeração (ver item 3.1.5 do Volume I). O economizador pode ser de dois tipos:
  - **Economizador Aberto –** trata-se de um conjunto de um dispositivo de expansão com um vaso separador de líquido, instalados após o processo de condensação. O dispositivo de expansão diminui a pressão de todo fluxo de fluido refrigerante líquido do ciclo até um valor intermediário provocando a geração de vapor e a diminuição da temperatura do fluido. No separador de líquido, a fase vapor segue para um ponto intermediário do processo de compressão (vários compressores permitem esta admissão de vapor no meio da compressão), enquanto que a fase líquida (em uma temperatura menor que a temperatura de condensação) segue para o dispositivo de expansão principal e para o evaporador. Neste processo, a entalpia do líquido que sai do economizador é bem menor que a entalpia do líquido da saída do condensador. Assim, o efeito de refrigeração no ciclo é maior, sem diminuição da vazão em massa do fluido refrigerante na sucção do compressor. O aumento de vazão em massa ocorre somente no ponto intermediário da compressão, com a injeção do fluxo de vapor proveniente do economizador.
  - **Economizador Fechado –** nesse caso é aplicado um trocador de calor adicional para intensificar o processo de sub-resfriamento do líquido antes do dispositivo de expansão principal. Para promover o sub-resfriamento extra no trocador de calor, uma parte do fluxo de líquido é desviada para um dispositivo de expansão auxiliar, onde é reduzida a uma pressão e temperatura intermediária. Após a expansão, a parcela de fluxo é evaporada no outro lado do trocador de calor e o vapor segue para um ponto intermediário do processo de compressão. A entalpia do líquido sub-resfriado na saída do economizador é bem menor que a entalpia do líquido da saída do condensador. Assim, o efeito de refrigeração no ciclo é maior, sem diminuição da vazão em massa do fluido refrigerante na sucção do compressor. O aumento de vazão em massa ocorre somente no ponto intermediário da compressão, com a injeção do fluxo de vapor proveniente do economizador. Ver Figura 10 do item 3.1.5 do Volume I.
- ***Fan Coil* –** condicionador de ar constituído de uma serpentina de resfriamento de ar que utiliza água gelada como meio de resfriamento e um ventilador para circulação do ar na serpentina e distribuição para a área a ser condicionada, que pode ser por meio de uma rede de dutos ou diretamente na área através de um *plenum*. Os elementos de controle podem ser desde um termostato no ambiente até uma malha mais complexa envolvendo controle de vazão de água gelada, vazão de ar, temperatura de insuflação e umidade do ar.
- ***Glide* –** o termo em inglês indica uma inclinação suave em um processo. Ocorre em misturas zeotrópicas de fluidos refrigerantes. No processo de evaporação, é a diferença de temperatura entre o final da evaporação (ponto de orvalho) do último componente da mistura a evaporar e o início da evaporação (ponto de ebulição) do primeiro componente da mistura a evaporar. No processo de condensação, é a diferença de temperatura entre o início da condensação (ponto de orvalho) do primeiro componente da mistura a condensar e o final da condensação (ponto de ebulição) do último componente da mistura a condensar. Ver itens 4.1.1 e 4.2.2 e Figura 33 do Volume I.
- **IEQ –** sigla do inglês para *Indoor Environmental Quality* – Qualidade do Ambiente Interno, abrange as condições dentro de um edifício tais como qualidade de ar, conforto térmico, iluminação, ergonomia, segurança, acessibilidade, e seus efeitos sobre os ocupantes ou residentes. As estratégias para abordar o IEQ incluem aquelas

que protegem a saúde humana, melhoram a qualidade de vida e reduzem o estresse e lesões potenciais. Melhor qualidade do ambiente interno melhora a vida dos ocupantes do edifício. Normalmente se mantém a sigla do inglês IEQ, pois em português ficaria QAI, sigla já aplicada para Qualidade do Ar Interior.

- ***Impeller* –** é o elemento rotativo ou rotor de um compressor centrífugo. Em português, o termo, raramente utilizado, é impulsor.
- **Incondensáveis –** são componentes gasosos adicionais a um determinado fluido refrigerante no circuito de refrigeração (normalmente indesejáveis), que se agregam ao fluido em sua fase vapor e são comprimidos, mas que não se condensam e ficam retidos na parte superior do condensador ou do recipiente de líquido. O gás incondensável mais comum é o ar, que pode ter penetrado no circuito de refrigeração por ocasião de um serviço de manutenção que exigiu a abertura do circuito de refrigeração, mas que ao final não se executou um processo de vácuo adequado. Pode ser também Nitrogênio utilizado para quebrar o vácuo.
- **IPVL –** o índice IPLV (do inglês, *Integrated Part Load Value* – valor integrado de carga parcial) é definido pelo ***ANSI/AHRI Standard 550/590 (IP) e AHRI Standard 551/591 (SI)*** como o valor que expressa a eficiência de um *Chiller*, considerando não apenas o seu desempenho em 100% de carga, mas a média ponderada considerando a sua operação em cargas parciais ao longo do ano em condições de operação fixas pré determinadas. O IPLV é utilizado para testes em fábrica apenas. Ver item 5.2 do Volume I.
- ***Lift* –** termo em inglês definido como a diferença de pressão do fluido refrigerante entre a descarga e a sucção no compressor do *Chiller*. Refere-se à elevação da pressão no compressor. Ver Figura 35 do item 6.2 do Volume I
- **met –** unidade de medida no SI para o **nível de atividade física das pessoas** que determina a taxa de metabolismo dos usuários num ambiente – 1 met = 58,2 W/m². Admitindo a superfície média de 1,8 m² para o corpo de um adulto, 1 met equivale a aproximadamente 105 W. Ver item 1.2.1 do Volume II.
- **NPVL –** referido pelos ***AHRI Standard 550/590 (I-P) e AHRI Standard 551/591 (SI)*** como o valor de carga parcial fora do padrão (do inglês, *Non-Standard Part Load Value*), ou seja, para condições de operação de projeto diferentes das apresentadas para o cálculo do IPLV, que são as condições padrão. O NPLV é utilizado para testes em fábrica apenas. Ver item 5.3 do Volume I.
- **OPR –** documento de requisitos de projeto do proprietário (do inglês, *Owner's Project Requirements*). O OPR é o principal documento de todo o projeto, uma espécie de carta magna, onde todos os requisitos do proprietário (que podem incluir os requisitos dos usuários e demais participantes do edifício ocupado) são estabelecidos, e que servirá de base para o desenvolvimento de todo o projeto. Ver item 3.1 do Volume II.
- **OCx –** sigla para o termo comissionamento contínuo (do inglês *Ongoing Commissioning*). Ver item 3.5 do Volume III.
- **PMOC –** Plano de Manutenção, Operação e Controle – plano de operação e manutenção normalmente limitado aos condicionadores de ar e à sala de máquinas onde estão instalados, com o objetivo de atender os requisitos de qualidade do ar de interiores. Deveria ser aplicado a todos os equipamentos e instalações de um sistema de ar condicionado, com objetivo de atender os requisitos de conforto, qualidade do ar e eficiência energética.
- **PMV –** sigla do inglês para *Predict Mean Vote* – Voto Médio Previsto – que prevê o valor médio dos votos de um grande grupo de pessoas na escala de sensibilidade térmica de sete pontos, que pode variar de -3,0 (muito frio) a +3,0 (muito quente), com o ponto ideal igual a 0,0 (sensação neutra) e os limites de tolerância para o conforto térmico entre -0,5 e +0,5. Ver item 1.2.1 do Volume II.
- **PPD –** sigla do inglês para *Predicted Percentage of Dissatisfied* – Percentual Previsto de Insatisfeitos – que estabelece uma previsão quantitativa da porcentagem de usuários insatisfeitos termicamente, determinadas pelo PMV, com um mínimo de 5,0% (nunca será possível agradar a todos) e o limite de tolerância de 10,0%. Ver item 1.2.1 do Volume II.
- **RCx –** sigla para o termo retrocomissionamento. Ver item 3.0 do Volume III.

- **Roda entálpica –** trocador de calor com elemento rotativo aplicado em sistemas de ar condicionado como recuperador de energia, com a função de pré-resfriar o ar externo quando estiver mais quente e úmido que o ar de expurgo rejeitado de um ambiente condicionado. Ou seja, ao invés de descartar para a atmosfera o ar de expurgo de um ambiente condicionado (normalmente com temperatura de bulbo seco entre 22 ºC e 25 ºC e com umidade relativa entre 45% e 65%), o fluxo de expurgo passa pela roda entálpica (por exemplo, em fluxo cruzado) para resfriamento inicial do ar externo, que passa pelo lado oposto entrando com condição entálpica superior. Pode ser utilizada também no inverno quando aplicada em sistemas de aquecimento. Ver Figura 11 do item 2.3 do Volume II.
- **SPVL –** O SPLV (sigla do inglês, *System Part Load Value* – valor de carga parcial do sistema), refere-se à média ponderada da eficiência energética em cargas parciais de uma instalação real, com vários *Chillers*, com perfil de operação específico, em função das características do projeto e dos horários de funcionamento do sistema, em uma determinada localidade, com suas condições climáticas próprias ao longo do ano. Ver item 5.4 do Volume I.
- **T_{BS} –** Sigla para Temperatura de Bulbo Seco do ar. Refere-se à temperatura do ar indicada em um termômetro com o bulbo seco ou sensor com a ponta da haste seca. Quando não houver nenhuma indicação específica, a temperatura do ar é a temperatura de bulbo seco.
- **T_{BU} –** Sigla para Temperatura de Bulbo Úmido do ar. Refere-se à temperatura do ar indicada em um termômetro com o bulbo suavemente molhado, com uma mecha envolvendo o bulbo, que é mantida úmida (por capilaridade) porque a parte de baixo da mecha fica mergulhada em um recipiente com água destilada. Outro detalhe importante é a necessidade de haver uma velocidade mínima do ar que passa pelo bulbo úmido do termômetro. A temperatura de bulbo úmido do ar é menor que a temperatura de bulbo seco, exceto na condição de 100% de umidade relativa, que neste caso é referida como a temperatura de ponto de orvalho (*dew point*) da água no ar, ou seja a temperatura na qual a quantidade de água presente no ar (umidade absoluta atual) satura e começa a condensar.

  A temperatura de bulbo úmido está relacionada com a entalpia do ar úmido e carece de um instrumento específico, normalmente apenas disponível em multimedidores de grandezas físicas do ar ou estações meteorológicas. A maioria dos sensores existentes mede o ponto de orvalho ou T_{BS} e UR. Como o cálculo da T_{BU} é complexo a partir das medições apenas da T_{BS} e UR, os resultados são por aproximação nem sempre são precisos.
- **VFD –** sigla do termo em inglês para *Variable Frequency Drive*. Refere-se ao inversor de frequência do motor elétrico de um equipamento. Em sistemas de ar condicionado, os inversores de frequência podem ser aplicados aos motores dos *Chillers*, bombas, ventiladores das torres de resfriamento e ventiladores dos condicionadores de ar e demais ventiladores e exaustores do sistema. Outra sigla também utilizada é VSD, do termo em inglês *Variable Speed Drive*.
- **VRF –** sigla do termo em inglês para *Variable Refrigerant Flow* – fluxo variável de fluido refrigerante – sistema de ar condicionado com expansão direta do fluido refrigerante para o resfriamento do ar, constituído de uma ou mais unidades condensadoras que operam em paralelo, porém com controle único integrado e um conjunto de várias unidades evaporadoras para atender diferentes zonas térmicas de um ambiente climatizado. Cada evaporadora possui uma válvula de controle contínuo de vazão de fluido refrigerante que é controlada por um sensor instalado na zona térmica atendida.
- **UR –** Sigla para Umidade Relativa do ar. Refere-se à relação entre a quantidade de água existente no ar (umidade absoluta) e a quantidade máxima que poderia haver na mesma T_{BS} (ponto de saturação). Expressa em porcentagem (%).



8 REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401/2008 – Instalações de Ar Condicionado – Sistemas Centrais e Unitários – Partes 1, 2 e 3**. Rio de Janeiro, 2010.

____. **NBR 13598/2011 – Vasos de Pressão para Refrigeração**. Rio de Janeiro, 2011.

____. **NBR 16069/2010 – Segurança em Sistemas de Refrigeração**. Rio de Janeiro, 2010.

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook – HVAC Applications**. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta, 2015.

____. **Performance Rating of Water-Chilling and Heat Pump Water-Heating Packages Using the Vapor Compression Cycle**. Standard 551/591 (SI) 2015. Arlington, 2015.

_____. **ASHRAE Guideline 0-2013 – The Commissioning Process**. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta, 2013.

_____. **ASHRAE Guideline 1.1-2007 – HVAC&R Technical Requirements for the Commissioning Process**. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta, 2007.

_____. **ASHRAE Guideline 1.4-2014 – Procedures For Preparing Facility Systems Manuals**. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta, 2014.

_____. **ASHRAE Handbook – Fundamentals (SI)**. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta, 2013.

_____. **ASHRAE Handbook – HVAC Systems and Equipment (SI)**. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta, 2015.

_____. **ASHRAE Standard 111-2008 – Measurement, Testing, Adjusting and Balancing of Building HVAC Systems**. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta, 2008.

_____. **Standard 90.1-2013 – Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. ANSI/ASHRAE/IESNA. Atlanta, 2013.

_____. **Standard 30-1995 – Method of Testing Liquid-Chilling Packages**. ANSI/ASHRAE. Atlanta, 1995.

AHRI. **Standard 550/590 (IP) 2015 – Performance Rating of Water-Chilling and Heat Pump Water-Heating Packages Using the Vapor Compression Cycle**. Arlington, 2015.

ANSI. **ANSI/ISA Standard 5.1-2009 - Instrumentation Symbols and Identification**. ANSI/ISA, Washington, 2009.

BARROS, M. **Síndrome de Baixo DT em Sistemas de Água Gelada**. Revista ABRAVA + Climatização e Refrigeração n. 36, pág. 28-31. Mar. 2017.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora n. 13**. Estabelece requisitos mínimos para gestão da integridade estrutural de caldeiras a vapor, vasos de pressão e suas tubulações de interligação nos aspectos relacionados à instalação, inspeção, operação e manutenção, visando à segurança e à saúde dos trabalhadores. Brasília, 2014.

BRUNING, S. **Load Calculation Spreadsheets – Quick Answers without Relying on Rules of Thumb**. ASHRAE Journal, v. 54, n. 1, pág. 40-46, jan. 2012.

BUSBY PERKINS+WILL. **Roadmap to the Integrated Design Process**. Stantec Consulting. BC Green Building Roundtable. Vancouver, 2007.

CENTER FOR THE BUILT ENVIRONMENT. **Thermal Comfort Tool**. University of California, Berkeley, 2016.

CUBI, E.M., KEITH D., LOVE J. **Integrated Design and UFAD**. ASHRAE Journal, v. 51, n. 7, pág. 30-40, jul. 2009.

DAIKIN INDUSTRIES. **AG 31-002 – Application Guide – Centrifugal *Chiller* Fundamentals**. Daikin Applied, 2015.

_____. AG 31-003 – ***Chiller* Application Guide - Fundamentals of Water and Air Cooled *Chillers***. Daikin Applied, 2014.

DURKIN, T. H. **Evolving Design of *Chiller* Plants**. ASHRAE Journal, v. 47, n. 11, pág. 40-50, nov. 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 15251/2007**. Indoor environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics. Bruxelas, 2007.

HEINZ, J. A., CASAULT, R.. **Building Commissioning Handbook**. 2ª ed. Building Commissioning Association. Beaverton, 2004.

NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCE. **Whole Building Design Guide**. Washington, 2015.

PETERSON, K. **Understanding the Commissioning Process**. P2S Engineering, Inc. Califórnia, 2007.

REINDL D., JEKEL T. **Engineering Safety Relief Systems – Industrial Refrigeration Consortium**. University of Wisconsin, Madison, 2006.

RINDLISBAKER, T. **How Design Engineers can Profit from Working with Commissioning Authorities**. In: XIII Encontro Nacional de Empresas Projetistas e Consultores da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. São Paulo, set. 2013.

STERLING E. et al. **Indirect Health Effects of Relative Humidity in Indoor Environments**. Environmental Health Perspectives, v. 65, pág. 351-361, 1986.

TRANE. **TRG-TRC010-EN – Air Conditioning Clinic - Centrifugal Water *Chillers***. Trane Heating and Air Conditioning Services & Systems, Ingersoll Rand, 2012.

_____. **TRG-TRC011-EN – Air Conditioning Clinic - Absorption Water *Chillers***. Trane Heating and Air Conditioning Services & Systems, Ingersoll Rand, 2012.

_____. **TRG-TRC012-EN – Air Conditioning Clinic - Helical-Rotary Water *Chillers***. Trane Heating and Air Conditioning Services & Systems, Ingersoll Rand, 2012.



9 CRÉDITOS DAS IMAGENS

Figura	Créditos
Figuras 9, 14, 27, 51 e 52	Midea Carrier do Brasil Ltda
Figuras 26 e 32	Daikin do Brasil Ltda
Figuras 10 e 28	Trane – Ingersoll Rand do Brasil Ltda
Figura 13	Semco LLC – Fläkt Woods Company
Figuras 30 e 31	Johnson Controls BE Ltda
Figura 34	Transcalor Ltda
Figura 49	BS&B Safety Systems LLC
Arte das Figuras	Q&A Designers





Empoderando vidas.
Fortalecendo nações.

MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE

