AR CONDICIONADO

MANUAL SOBRE SISTEMAS DE ÁGUA GELADA

VOLUME III

ANÁLISES TÉCNICO-ECONÔMICAS E ESTRATÉGIAS DE OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS

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 III

ANÁLISES TÉCNICO-ECONÔMICAS E
ESTRATÉGIAS DE OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS

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 : análises técnico-econômicas e estratégias de otimização de sistemas / 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.

115 p. : il. (algumas color). ; gráficos ; v. 3.

ISBN: 978-85-7738-338-2

1.Refrigeração de ar condicionado. 2.Sistema de água gelada. 3.Vantagens de sistemas de água gelada. 3.Benefícios econômicos do projeto. 4.Processo de retrocomissionamento. 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 – Principais atividades do processo de retrocomissionamento 38

Figura 2 – Fluxograma das atividades do processo de retrocomissionamento e suas iterações 39

Figura 3 – Fluxograma das atividades durante a fase de Avaliação Inicial do Sistema 40

Figura 4 – Fluxograma das atividades durante a fase de Investigação e Análise do Sistema 41

Figura 5 – Fluxograma das atividades durante a fase de Implementação das Medidas de Correção e Melhorias 44

Figura 6 – Fluxograma das atividades durante a fase de acompanhamento final e preparação das equipes de operação 46

Figura 7 – Fluxograma das atividades durante a fase de Comissionamento Contínuo 49

Figura 8 – Fluxograma esquemático de um sistema com circuito primário e secundário de água gelada 51

Figura 9 – Sistema de água gelada com BAGPs dedicadas, com as válvulas de bloqueio manual da BAGP reserva mantidas sempre abertas 54

Figura 10 – Sistema de água gelada com BAGPs dedicadas – Válvulas de bloqueio manual da BAGP reserva permanecem fechadas 55

Figura 11 – Sistema de água gelada com BAGPs dedicadas – Instalar válvulas de bloqueio motorizadas para manobra automática de operação da BAGP reserva 56

Figura 12 – Condição 1 – 05h00min – Sistema com tanque de termoacumulação de água gelada "carregado" 57

Figura 13 – Condição 2 – 10h30min – Sistema com tanque de termoacumulação de água gelada "descarregando" fora do horário de ponta 58

Figura 14 – Condição 3 – 17h30min – Sistema com tanque de termoacumulação de água gelada totalmente "descarregado" no início do horário de ponta 59

Figura 15 – Condição 4 – 17h30min – Sistema com tanque de termoacumulação de água gelada totalmente "carregado" no início do horário de ponta 61

Figura 16 – Exemplo de *Chiller* com vários circuitos de refrigeração em paralelo 62

Figura 17 – Central de Água Gelada – *Chillers* 66

Figura 18 – Central de Água Gelada – BAGMs/ BAGXs 67

Figura 19 – Central de Água Gelada – BACs 67

Figura 20 – Torres de Resfriamento 68

Figura 21 – Resultados da simulação do cálculo da serpentina de um *Fan Coil* típico, utilizando água gelada a 6,0 ºC 70

Figura 22 – Sistema improvisado de purga de ar manual 72

Figura 23 – Posições das caixas de VAV e VAC no pavimento (números em vermelho) e as áreas atendidas pelas VAVs (amarelo) e VACs (azul) 73

Figura 24 – Duto desencaixado do *Troffer* na luminária – Ar insuflado no forro 73

Figura 25 – Fitas Adesivas colocadas pelos usuários bloqueando o fluxo de ar nos difusores 79

Figura 26 – Estação de M&V portátil de mesa das principais grandezas das condições ambientes 97

Figura 27 – Estação de M&V móvel das principais grandezas das condições ambientes 97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Capacidade máxima e eficiência – novo sistema com DOAS vs. sistema atual 89

Quadro 2 – Plano de ação de correções e os custos de investimento estimado 90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre sistemas de ar condicionado – Tradicional x Simulação Energética – Características e COP. 15

Tabela 2 – Comparação entre sistemas de ar condicionado – Tradicional vs. Simulação Energética – Custos de Operação – Consumo de Energia 16

Tabela 3 – Comparação entre sistemas de ar condicionado – Tradicional vs. Simulação Energética – Custo Inicial de Investimento 16

Tabela 4 – Comparação entre valores de referências tradicionais adotadas em projetos de sistemas de água gelada e novas referências, com vistas à otimização energética 17

Tabela 5 – Comparação entre valores de referências tradicionais e novas referências. Resultados do dimensionamento 18

Tabela 6 – Comparação entre valores de referências tradicionais e novas referências. Resultados do dimensionamento de um sistema de água gelada – Custos de investimento e consumo de energia– Custos de Operação – Consumo de Energia 19

Tabela 7 – Requisitos mínimos de eficiência energética para vários tipos de *Chillers*, estabelecidos pelo ***ASHRAE Standard 90.1-2016 SI***– Custo Inicial de Investimento 20

Tabela 8 – Comparação de custos operacionais de alguns tipos de *Chillers*, com capacidade de 1.583 kW (450 ton) envolvendo o consumo de energia (elétrica ou gás natural) e o consumo de água de resfriamentode água gelada e novas referências, com vistas à otimização energética 22

Tabela 9 – Tarifa de consumo de água e esgoto (vigente em 01/2017) para instalações comerciais e industriais na região metropolitana de São Paulo, com contratos de demanda firme (consumo mínimo) 23

Tabela 10 – Tarifa de consumo de gás natural (vigente em 04/2017) para sistemas de refrigeração na região metropolitana de São Paulo. 24

Tabela 11 – Gastos anuais de Salários, Energia Elétrica e Manutenção 30

Tabela 12 – Níveis de eficiência energética em sistemas de ar condicionado 30

Tabela 13 – Sistemas do tipo VRF vs. Sistemas de água gelada 31

Tabela 14 – Descrição das atividades de um processo de retrocomissionamento completo 37

Tabela 15 – Valores atuais de projeto por pavimento ocupado e a vazão mínima requerida pela ***ABNT NBR 16401:2008*** para os níveis 1 e 2 69

Tabela 16 – Desvios encontrados na Verificação de Instalação – Central de Água Gelada 71

Tabela 17 – Desvios encontrados na Verificação de Instalação – Condicionadores de Ar 72

Tabela 18 – Capacidade máxima e eficiência – novo sistema vs. sistema atual 88

Tabela 19 – Consumo de energia anual e TEWI – *Chillers* com R-22 vs. *Chillers* com R-134a 88

Tabela 20 – Capacidade máxima e eficiência – novo sistema com DOAS vs. sistema atual 89

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição dos custos principais de um edifício ao longo de sua vida útil 28

Gráfico 2 – Distribuição dos custos de operação e manutenção de um edifício 29

Gráfico 3 – Distribuição dos custos principais de um edifício ao longo de sua vida útil, incluindo os custos dos salários dos usuários 29

Gráfico 4 – Impactos não energéticos das melhorias em sistemas de ar condicionado, resultantes dos processos de retrocomissionamento 35

Gráfico 5 – Perfil de temperaturas de água gelada no sistema 52

Gráfico 6 – Perfil de vazão de água gelada nos *Chillers* 52

Gráfico 7 – Perfil de temperaturas de água de resfriamento nos *Chillers* 53

Gráfico 8 – Perfil de vazão de água gelada no circuito primário e secundário 60

Gráfico 9 – Perfil de temperaturas de água gelada em *Chiller* com vários circuitos de refrigeração em paralelo 63

Gráfico 10 – BAGM-01A – Curva Característica 74

Gráfico 11 – BAGM-01A – Eficiência 74

Gráfico 12 – BAC-01B – Curva Característica 75

Gráfico 13 – BAC-01B – Eficiência 75

Gráfico 14 – TR-03 – "*Approach*" da torre 76

Gráfico 15 – TR-03 – Coeficiente de Eficácia da torre (K.A) 77

Gráfico 16 – TR-02 – "*Approach*" da torre 77

Gráfico 17 – TR-02 – Coeficiente de Eficácia da torre (K.A) 78

Gráfico 18 – *Chiller* UR-01B – Temperatura da Água Gelada 80

Gráfico 19 – *Chiller* UR-01B – Temperatura da Água de Resfriamento 80

Gráfico 20 – *Chiller* UR-01B – Perfil de Carga Parcial 81

Gráfico 21 – *Chiller* UR-01B – Eficiência Energética 81

Gráfico 22 – *Chiller* UR-03 – Temperatura da Água Gelada 82

Gráfico 23 – *Chiller* UR-03 – Temperatura da Água de Resfriamento 83

Gráfico 24 – *Chiller* UR-03 – Perfil de Carga Parcial 83

Gráfico 25 – *Chiller* UR-03 – Eficiência Energética 84

Gráfico 26 – Resultado da pesquisa de satisfação dos ocupantes realizada posterior à renovação do sistema de ar condicionado (2010) – 26 % satisfeitos 95

Gráfico 27 – Resultado da pesquisa de satisfação dos ocupantes realizada posterior à renovação do sistema de ar condicionado (2010) – 77 % satisfeitos 95

Gráfico 28 – Classificação Percentil de Edifícios da Base de Dados do CBE na categoria de conforto térmico 96



SUMÁRIO

1	BENEFÍCIOS ECONÔMICOS DE PROJETOS COM SISTEMAS EFICIENTES DE ÁGUA GELADA	13
2	VANTAGENS DOS SISTEMAS DE ÁGUA GELADA	27
3	PROCESSO DE RETROCOMISSIONAMENTO EM SISTEMAS DE AR CONDICIONADO DE EDIFÍCIOS	35
4	PROCESSO DE RETROCOMISSIONAMENTO EM SISTEMAS DE ÁGUA GELADA RELATO DE CASO – PROJETO DEMONSTRATIVO	65
5	PROCESSOS PARA MEDIAÇÃO E VERIFICAÇÃO (M&V) DE DESEMPENHO	93
6	GLOSSÁRIO	107
7	REFERÊNCIAS	113
8	CRÉDITOS DAS IMAGENS	115



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 BENEFÍCIOS ECONÔMICOS DE PROJETOS COM SISTEMAS EFICIENTES DE ÁGUA GELADA

1.1 CARGA TÉRMICA PARA DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS

Em um sistema de ar condicionado, quanto maior a carga térmica de pico "definida" pelo projeto (não necessariamente o resultado dos cálculos), maior será o investimento inicial.

Como mencionado no item 1.2.2 do Volume II, é muito comum a prática de se utilizar a relação tradicional de 20 m²/ton para o dimensionamento dos equipamentos e componentes do sistema de ar condicionado, ou seja, para cada 20 m² de área condicionada, a carga térmica considerada é de 3.517 W (1 ton). Esse valor é resultante de métodos de cálculos aplicados a edifícios antigos, com envoltória, sistemas de iluminação e demais cargas elétricas com características muito diferentes das atuais. Hoje esses métodos estão ultrapassados e os dados antigos se tornaram superdimensionados.

Com a utilização de *softwares* de cálculo de carga térmica e de simulação energética de edifícios, verifica-se que para edifícios de escritórios, a relação resultante é de, no mínimo, 27 m²/ton, para cidades como o Rio de Janeiro e 33 m²/ton para cidades como São Paulo e ainda assim, a relação tradicional permanece sendo utilizada em muitos projetos, mesmo aqueles com programas de certificação de edifícios sustentáveis.

Os principais resultados do superdimensionamento da carga térmica e dos equipamentos e componentes são:

- **Custo do investimento inicial –** para qualquer empreendedor este já seria o motivo principal, mas há outros resultados consequentes que são ainda piores;
- **Corte de gastos no restante do sistema –** uma vez que o custo inicial está elevado, haverá cortes e "simplificações" no sistema de ar condicionado que o tornará muitas vezes limitado e certamente resultará em desconforto térmico, além de ineficiência operacional. Os principais cortes são nos elementos de controle, na qualidade dos componentes auxiliares (válvulas, sensores, caixas de VAV) e no sistema de automação (quantidade de pontos analógicos e digitais, memória de hardware, controladoras);
- **Equipamentos superdimensionados –** em sistemas com três ou mais *Chillers*, o impacto é menor, pois, devido ao excesso carga térmica (superior a 33%), o terceiro *Chiller* se torna um equipamento reserva, um item importante, mas que nem sempre é considerado nos projetos por causa do custo inicial. No entanto, o superdimensionamento dos demais componentes do sistema (principalmente dos condicionadores de ar e da rede de dutos e seus elementos auxiliares) resultará em problemas operacionais para atender os requisitos de conforto térmico e qualidade do ar durante os períodos de temperaturas mais amenas.
- **Espaço no *plenum* do forro –** quanto maior a carga térmica no pavimento, maiores serão os equipamentos selecionados e as dimensões da rede de distribuição de ar, que podem resultar em limitações de espaço no *plenum*, onde dutos e caixas de VAV disputam o espaço com tubulações e componentes de outros sistemas prediais.

Em um levantamento realizado com algumas empresas de consultoria para processos de certificação, em mais de 100 projetos de edifícios de escritórios (lajes corporativas), em várias cidades, mas principalmente São Paulo e Rio de Janeiro, cerca de 85% dos projetos do sistema de ar condicionado com sistemas de água gelada apresentaram a relação de 20 m²/ton, enquanto o resultado do cálculo realizado por simulação energética mostrou um valor médio de 33 m²/ton. Em alguns sistemas com VRF, a relação de projeto chegou a 15 m²/ton.

A seguir, três exemplos com resultados finais dos cálculos da carga térmica indicando a carga calculada e a carga adotada para o dimensionamento dos equipamentos e componentes do sistema de ar condicionado:

PROJETO 1 – PROJETO DE LAJE CORPORATIVA – SÃO PAULO

- Sistema de água gelada
- Cargas: 69% sensível/ 31% latente
- *Setpoint* da temperatura nos ambientes climatizados: 23,0 °C +/- 1,0 °C
- Temperatura na saída da serpentina: 11,1 °C
- Umidade relativa nos ambientes: inverno = 45% / verão = 50%
- Carga térmica – simulação: 2.077 ton (33,7 m²/ton)
- Carga térmica – adotada: 3.550 ton (19,7 m²/ton)

PROJETO 2 – PROJETO DE LAJE CORPORATIVA – RIO DE JANEIRO

- Sistema de água gelada
- Pré-tratamento de ar externo com roda entálpica
- Cargas: 70% sensível/ 30% latente
- *Setpoint* da temperatura nos ambientes climatizados: 23,0 °C +/- 1,0 °C
- Temperatura na saída da serpentina: 15,0 °C
- Umidade relativa nos ambientes: inverno = 45% / verão = 60%
- Carga térmica – simulação: 1.791 ton (34,3 m²/ton)
- Carga térmica – adotada: 3.150 ton (19,5 m²/ton)

PROJETO 3 – PROJETO DE LAJE CORPORATIVA – SÃO PAULO

- Sistema do tipo VRF
- Pré-tratamento de ar externo com roda entálpica
- Cargas: 73% sensível/ 27% latente
- *Setpoint* da temperatura nos ambientes climatizados: 24,0 °C +/- 1,0 °C
- Temperatura na saída da serpentina: 17,3 °C
- Umidade relativa nos ambientes: inverno = 50% / verão = 67%
- Carga térmica – simulação: 1.043 ton (39,3 m²/ton)
- Carga térmica – adotada: 2.560 ton (16,0 m²/ton)

Vale observar que os projetos 2 e 3 utilizavam roda entálpica para pré-resfriamento do ar externo, o que deveria resultar em menor relação de área/ carga térmica nos ambientes, mas ainda assim foram mantidas as relações tradicionais.

Outro ponto é que apenas no projeto 1 o valor da umidade relativa de projeto nos ambientes durante o pico de verão foi de 50%. No projeto 2, no Rio de Janeiro, com sistema de água gelada, o valor calculado da umidade relativa nos ambientes climatizados, durante o verão foi de 60% e no projeto 3, em São Paulo, com sistema do tipo VRF a umidade relativa calculada foi de 67% no verão, um valor acima dos limites recomendados pela ASHRAE.

A partir das considerações anteriores, as Tabelas 1, 2 e 3 apresentam os resultados de um estudo comparativo entre dois sistemas de ar condicionado para um mesmo edifício de escritórios em São Paulo.

O projeto 1 adotou a relação de 20 m²/ton e aplicou uma solução tradicional. O projeto 2 teve todo sistema dimensionado a partir de um *software* de simulação energética, no qual foram aplicadas várias análises de otimização para a definição do sistema, o que resultou em uma relação de área por carga térmica de 31 m²/ton.

Um dos principais resultados a serem comparados na Tabela 1 é o valor de carga térmica total. Pode-se verificar que na opção 1 com o projeto tradicional, a carga térmica de referência para dimensionamento de todos os componentes do sistema é de 6.330 kW, enquanto na opção 2 é de apenas 4.083 kW – 35% menor. É importante lembrar que, em ambos os projetos, as condições de conforto e qualidade do ar ambiente são garantidas, considerando as mesmas premissas de projeto.

O outro resultado importante é o COP total (em carga plena) do sistema, que na opção 2 ficou em 5,19 (incluindo as potências dos ventiladores dos Fan Coils), cerca de 33% acima da opção 1.

O principal resultado sobre eficiência energética pode ser verificado na Tabela 2, na qual é apresentada uma comparação de custos de operação, considerando apenas o consumo de energia e a demanda contratada. Os valores apresentados são

Tabela 1 – Comparação entre sistemas de ar condicionado – Tradicional x Simulação Energética – Características e COP.

Opção de Projeto		**1**	**2**
Relação de Carga Térmica		**Tradicional 20m²/ton**	**Simulação 31m²/ton**
Área Climatizada	m²	36.000	36.000
Pavimentos		25	25
Setpoint Temperatura Ambiente	°C	24,0 °C	24,0 °C
Umidade Relativa Ambiente	%	50%	50%
Carga Térmica Total	**kW**	**6.330**	**4.083**
Carga Térmica Total	**ton**	**1.800**	**1.161**
Carga Térmica/Pavimento	kW	253	163
Capacidade Total - CAG	kW	6.330	4.110
Quantidade de *Chillers*		**3x 600 ton**	**2x 470 ton + 1x 230 ton + 1x 470 ton (Reserva)**
DOAS		Não	Sim
DOAS + *Chiller* Dedicado		Não	Sim
Chiller em Série		Não	Sim
Setpoint – Chillers Normais	°C	6,7	13,0 / 10,0
Setpoint – Chillers para DOAS	°C	---	5,0
Condicionadores de Ar		*Fan Coils*	Vigas Frias + *Fan Coils*
Referência de Eficiência		***ASHRAE 90.1-2010***	***ASHRAE 90.1-2016***
COP – Total do Sistema de Ar Condicionado	**kW/kW**	**3,1**	**5,19**
Eficiência do Sistema	**kW/ton**	**0,900**	**0,677**

Fonte: Elaboração do autor.

baseados no perfil de carga térmica da opção 2, com valores mais próximos do real, uma vez que a opção 1 adotou valores superdimensionados (senão, a diferença seria ainda maior). Portanto, considerando apenas o consumo de energia e demanda contratada, estima-se uma economia anual de aproximadamente R$ 279.000,00, cerca de 38% em relação ao consumo anual estimado para a opção 1.

Entretanto, o resultado que mais atrai os empreendedores é o valor final da Tabela 3, que indica uma redução de 14% no custo inicial do sistema de ar condicionado para a opção 2, que oferece um sistema bem mais eficiente e confiável e com melhor controlabilidade para atender e garantir os requisitos de conforto térmico e qualidade do ar interior. E a diferença se deve apenas à engenharia de concepção do sistema.

Tabela 2 – Comparação entre sistemas de ar condicionado – Tradicional vs. Simulação Energética – Custos de Operação – Consumo de Energia

Opção de Projeto		**1**	**2**
Relação de Carga Térmica		**Tradicional 20m²/ton**	**Simulação 31m²/ton**
Carga Térmica Total	**kW**	**6.330**	**4.083**
Carga Térmica Total	**ton**	**1.800**	**1.161**
COP – Sistema de Ar Condicionado	**kW/kW**	**3,91**	**5,19**
Potência Total Instalada	kW	1.619	787
Consumo de Energia Anual Estimado	MWh	2.217	1.371
Custo Anual – Energia	R$/ano	731.000,00	452.000,00
Economias – Consumo de Energia	**R$/ano**	**---**	**279.000,00 (38%)**

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 3 – Comparação entre sistemas de ar condicionado – Tradicional vs. Simulação Energética – Custo Inicial de Investimento

Opção de Projeto		**1**	**2**
Relação de Carga Térmica		**Tradicional 20m²/ton**	**Simulação 31m²/ton**
Carga Térmica Total	**kW**	**6.330**	**4.083**
Carga Térmica Total	**ton**	**1.800**	**1.161**
Custo do projeto de HVAC	R$	600.000,00	750.000,00
Custo da instalação de HVAC	R$/ton	11.000,00	15.000,00
Custo da instalação de HVAC	R$	19.800.000,00	17.415.000,00
Diferença entre custos	**R$**	---	**-2.385.000,00 (-12%)**
Custo – Condicionadores de Ar	R$	900.000,00	770.000,00
Custo – *Chillers*	R$	3.450.000,00	3.450.000,00 **(1 Reserva)**
Custo – Bombas + Torres	R$	1.600.000,00	580.000,00
Custo – Automação HVAC	R$	1.500.000,00	1.900.000,00
Custo Total – Equipamentos Principais	R$	7.450.000,00	6.400.000,00
Diferença entre custos	**R$**	---	**-1.050.000,00 (-14%)**

Fonte: Elaboração do autor.

1.2 NOVAS REFERÊNCIAS PARA DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS

Alguns dados de projeto, que se tornaram referências tradicionais para o dimensionamento de todo o sistema precisam ser revistos. Como já mencionado no item 1.4 do Volume II, com a adoção de novas referências a partir dos resultados de simulação energética do edifício, que permite, inclusive, incluir a avaliação dos níveis de satisfação dos usuários em relação ao conforto térmico, é possível obter ganhos de eficiência energética consideráveis no sistema de água gelada, incluindo custo de investimento menor, ao mesmo tempo que se garante o conforto térmico e um melhor controle das variáveis no ambiente.

A Tabela 4 mostra um comparativo sobre os vários dados de referência, muitos deles "consagrados", mas que merecem ser desafiados com o objetivo da real otimização energética do sistema.

A Tabela 5 apresenta uma comparação de eficiência energética entre os resultados do dimensionamento de um sistema de água gelada convencional com condensação a água, utilizando as referências tradicionais e os resultados do mesmo sistema utilizando as novas referências.

Observação:

- Diferente do item 1.1, foram considerados projetos com a mesma concepção do sistema de ar condicionado e mesmo tipo de equipamentos. Porém, o projeto com referências tradicionais utilizou um sistema de água gelada com circuito primário e secundário (com BAGPs e BAGSs) e o projeto com novas referências utilizou um sistema de circuito único com vazão de água gelada variável (apenas com BAGMs).

Tabela 4 – Comparação entre valores de referências tradicionais adotadas em projetos de sistemas de água gelada e novas referências, com vistas à otimização energética

		Referências Tradicionais	Novas Referências
Setpoint Ambiente	ºC	24,0 ºC (1,0 clo)	PMV/ PPD Ref.: 25,0 ºC (0,61 clo)
Umidade Relativa	%	50%	55%
Temperatura de Insuflação	ºC	11,0 ºC a 13,0 ºC	13,0 ºC a 15,0 ºC
Temperatura de Água Gelada	ºC	12,2 ºC → 6,7 ºC	15,5 ºC → 7,5 ºC
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	ºC	29,5 ºC	Max.TBU-ASHRAE-Ref + 3,5 ºC
Temperatura de Bulbo Úmido do Ar Externo	ºC	24,0 ºC (São Paulo)	Max.TBU-ASHRAE-Ref = 0,4% (São Paulo= 23,2 ºC)
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.

Tabela 5 – Comparação entre valores de referências tradicionais e novas referências. Resultados do dimensionamento de um sistema de água gelada – eficiência energética

Dados de Projeto		Referências Tradicionais	Novas Referências
Capacidade Total	**kW**	**4,571**	**4.160**
Capacidade Total	ton	1.300	1.183
Potência – *Chillers*	kW	760	642
COP – *Chillers* ***(ASHRAE Std 90.1-2016 SI)***	kW/kW	6,018	6,479
Potência – BAGPs	kW	65	0
Potência – BAGSs/ BAGMs	kW	83	46
Potência – BACs	kW	95	35
Potência – Torres (Ventiladores)	kW	33	33
Potência – *Fan Coils* (Ventiladores)	kW	173	133
Potência – Ar Externo (Ventiladores)	kW	30	30
Potência Total	kW	1.239	919
COP – Total	**kW/kW**	**3,691**	**4,525**
Consumo de Energia Anual Estimado	**MWh**	**2.363**	**1.753**
Redução de Potência Total	kW	---	- 320
Redução de Consumo de Energia	**MWh**	**---**	**- 610 (26%)**

Fonte: Elaboração do autor.

- Nos dois projetos o cálculo da carga térmica foi realizado por simulação energética. A diferença entre os resultados se deve apenas à adoção de valores diferentes de temperatura, umidade relativa do ar nos ambientes climatizados e clo dos usuários (índice de vestimenta – ver item 1.2.1 do Volume II).

Os principais resultados verificados foram na redução da carga térmica em 9%, e na redução da potência instalada (que afeta a demanda contratada) e do consumo de energia anual, ambos em 26%.

A Tabela 6 apresenta uma comparação de custos de investimento inicial e consumo de energia entre os resultados do dimensionamento de um sistema de água gelada com condensação a água, utilizando as referências tradicionais e os resultados do mesmo sistema utilizando as novas referências.

Considerando o mesmo valor de relação de custo por carga térmica da instalação, a redução do custo inicial para o sistema com novas referências foi de 9%, além de proporcionar uma economia anual na conta de energia de R$ 125.000,00 aproximadamente, o equivalente a dois meses de conta de energia relativa ao sistema de ar condicionado do edifício em estudo.

1.3 COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES TIPOS DE *CHILLERS*

Durante o processo de análise de viabilidade de um sistema de água gelada, uma tarefa importante

Tabela 6 – Comparação entre valores de referências tradicionais e novas referências. Resultados do dimensionamento de um sistema de água gelada – Custos de investimento e consumo de energia

Dados de Projeto		Referências Tradicionais	Novas Referências
Capacidade Total	**kW**	**4.571**	**4.160**
Capacidade Total	ton	1.300	1.183
Custo instalação HVAC	R$/ton	13.000,00	13.000,00
Custo instalação HVAC	R$	16.900.000,00	15.379.000,00
Diferença entre custos	**R$**	---	**-1.521.000,00 (-9%)**
Custo Condicionadores	R$	650.000,00	470.000,00
Custo *Chillers*	R$	2.600.000,00	2.350.000,00
Custo Bombas + Torres	R$	1.000.000,00	730.000,00
Custo Total Equipamentos Principais	R$	4.250.000,00	3.550.000,00
Diferença entre custos	**R$**	---	**-700.000,00 (-16%)**
Redução no consumo de energia anual estimado	**R$**	---	**125.000,00**

Fonte: Elaboração do autor.

é a comparação entre diferentes tipos de *Chillers* que podem ser aplicados naquele projeto e qual a melhor alternativa.

Muitas vezes os estudos analisam apenas o custo inicial e eventualmente incluem a avaliação da eficiência energética. Mas a melhor alternativa pode envolver vários quesitos:

- Custo inicial de investimento;
- Eficiência energética (custos de consumo de energia);
- Consumo de água;
- Custos de manutenção do equipamento;
- Custos de manutenção dos demais componentes do sistema de água gelada;
- Área total ocupada pela central de água gelada (*Chillers*, bombas, torres de resfriamento, painéis elétricos e demais componentes);
- Vida útil do equipamento;
- Relacionamento do cliente com o fabricante do *Chiller*;
- Preferência pessoal do cliente.

No entanto, é muito importante que a análise seja realizada de maneira independente, preferencialmente pelo consultor responsável pelo projeto.

As comparações mais comuns envolvem comparações entre *Chillers* com diferentes tipos de compressores (ex. centrífugo vs. parafuso) ou entre *Chillers* com condensação a água e condensação a ar.

Outra comparação um pouco mais complexa é entre *Chillers* com ciclo de compressão a vapor, com motores elétricos, e *Chillers* com ciclo de absorção, que podem ter diferentes tipos de fontes térmicas para o aquecimento do gerador do *Chiller* (maiores detalhes, ver item 3.2 do Volume I).

A Tabela 7 mostra um comparativo de requisitos mínimos de eficiência energética para vários tipos de *Chillers*, estabelecidos pelo ***ASHRAE Standard 90.1-2016 SI***. Os *Chillers* com ciclos de absorção possuem COP muito baixo (normalmente entre 0.7 e 1.5 para *Chillers* que utilizam a solução LiBr-H_2O), porém, considerando que o custo da fonte de energia térmica pode ser

Tabela 7 – Requisitos mínimos de eficiência energética para vários tipos de *Chillers*, estabelecidos pelo ***ASHRAE Standard 90.1-2016 SI***

Tipo de Equipamento	Faixa de Capacidade	Eficiência Energética Mínima Requerida			
		Alternativa 1 (Path A)		Alternativa 2 (Path B)	
		COP (100%)	IPLV	COP (100%)	IPLV
Condensação a Ar (com condensador incluso)	< 528 kW	2,985	4,048	2,866	4,669
	≥ 528 kW	2,985	4,137	2,866	4,758
Condensação a Água (compressor do tipo alternativo parafuso ou *scroll*)	< 264 kW	4,694	5,867	4,513	7,041
	≥ 264 kW e < 528 kW	4,889	6,286	4,694	7,184
	≥ 528 kW e < 1.055 kW	5,334	6,519	5,177	8,001
	≥ 1.055 kW e < 2.110 kW	5,771	6,770	5,633	8,586
	≥ 2.110 kW	6,286	7,041	6,018	9,264
Condensação a Água (compressor centrífugo)	< 528 kW	5,711	6,401	5,065	8,001
	≥ 528 kW e < 1.055 kW	5,711	6,401	5,544	8,801
	≥ 1.055 kW e < 1.407 kW	6,286	6,770	5,917	9,027
	≥ 1.407 kW e < 2.110 kW	6,286	7,041	6,018	9,264
	≥ 2.110 kW	6,286	7,041	6,018	9,264
Absorção Condensação a ar, de simples efeito	Todas	0,600	–	–	–
Absorção Condensação a água, de simples efeito	Todas	0,700	–	–	–
Absorção Condensação a água, de duplo efeito e queima indireta	Todas	1,000	1,050	–	–
Absorção Condensação a água, de duplo efeito e queima direta	Todas	1,000	1,000		

Fonte: Elaboração do autor.

muito menor que o da energia elétrica (e até gratuito quando a fonte de calor for rejeito de outro processo), essa poderá ser uma alternativa extremamente atrativa economicamente para determinadas aplicações.

A Tabela 8 apresenta o resultado de um estudo comparativo entre algumas opções de *Chillers*, incluindo condensação a água e condensação a ar e ciclo de compressão a vapor e ciclo de absorção.

A seguir as considerações específicas para este estudo:

- Todos os *Chillers* foram selecionados para uma capacidade de 1.583 kW (450 ton);
- Os *Chillers* elétricos foram selecionados de acordo com os requisitos do ***AHRI Standard 551/591-2015 (SI)***. Os *Chillers* com ciclo de absorção (opções 4 e 5) foram selecionados de acordo com o ***AHRI Standard 560-2000***. Todos, porém, nas mesmas condições de água gelada e água de resfriamento;
- Para todos os *Chillers*, exceto a opção 5, foram utilizados como referência de eficiência energética os requisitos mínimos de COP e IPLV do ***ASHRAE Standard 90.1-2016 SI***, conforme indicado na Tabela 7 (para capacidade de 1583 kW). Os índices utilizados para todos os *Chillers* com motores elétricos foram conforme a opção 2 ("Path B", no original em inglês), considerando que todos os *Chillers* possuem motores com inversores de frequência. Para estes não foram utilizados resultados de selecionamento de fabricantes;
- A exceção foi a opção 5, com ciclo de absorção, identificado como de "Alta Eficiência", uma vez que os requisitos do ***ASHRAE Standard 90.1-2016*** para os *Chillers* de Absorção são relativamente baixos em relação aos melhores equipamentos do mercado, o que não acontece no caso dos *Chillers* elétricos em geral (apesar de todos os fabricantes de *Chillers* elétricos também possuírem vários equipamentos com índices de eficiência mais elevados que a norma de referência);
- Os *Chillers* com ciclo absorção selecionados foram de duplo-efeito e utilizaram como fonte de calor para o gerador a queima direta de gás natural. Esta é a opção mais comum para *Chillers* com ciclo de absorção aplicados em sistemas para edifícios;
- Para todos os *Chillers* com condensação a água foi inclusa na análise a vazão de água de resfriamento, que é muito maior para os *Chillers* com ciclo de absorção que nos *Chillers* elétricos (devido ao baixo COP, o calor rejeitado é muito maior). Quanto maior o calor rejeitado e a vazão de água de resfriamento, maiores as perdas de água por evaporação na torre de resfriamento;
- Além disso, a perda de carga no circuito de água de resfriamento dos *Chillers* com ciclo de absorção é maior, pois são dois trocadores em série (absorvedor e condensador), normalmente entre 80 e 100 kPa, contra 30 a 50 kPa típicos dos condensadores dos *Chillers* elétricos. A ser verificado em um caso real;
- As torres de resfriamento foram selecionadas com base nas condições de operação padrão para sistemas de ar condicionado (35,0 ºC/ 29,5 ºC/ 24,0 ºC). Eventualmente os fabricantes dos *Chillers* podem definir outro padrão. Neste caso é importante realizar a análise total envolvendo *Chillers*, BACs e torres de resfriamento, em função da TBU do ar externo local de projeto e sua variação ao longo do ano.
- Para o cálculo do consumo anual estimado de energia elétrica dos *Chillers*, foi utilizado o IPLV a partir de um sistema operando 12 horas/ dia, durante 20 dias no mês e por 12 meses. Para os demais equipamentos elétricos foi considerada a operação contínua (sem considerar inversores de frequência) para o mesmo período dos *Chillers*.

  Deve-se observar que o IPLV é valor totalmente fictício (ver item 5.2 do Volume I). Sempre que possível, deve-se utilizar um PLV específico (SPLV – ver item 5.4 do Volume I), com base nas condições climáticas do local, considerando as horas reais de operação do sistema, que resultará numa distribuição real de ponderação das cargas parciais.
- Para o cálculo do consumo de gás natural (*Chillers* com ciclo de absorção), foi arbitrado um fator médio de carga parcial do sistema de 0,57, ou seja, foi arbitrado que na média anual, durante o funcionamento do sistema, a capacidade do *Chiller* foi de 57% da capacidade de projeto.
- Nos *Chillers* com condensação a água, para o cálculo do consumo de água de reposição na torre de resfriamento foi considerado 1,3 L/h por kW de calor rejeitado considerando o fator mé-

Tabela 8 – Comparação de custos operacionais de alguns tipos de *Chillers*, com capacidade de 1.583 kW (450 ton) envolvendo o consumo de energia (elétrica ou gás natural) e o consumo de água de resfriamento

Opção de Chiller		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Equipamento		***Chiller*** **Centrífugo**	***Chiller*** **Parafuso**	***Chiller*** **Parafuso**	***Chiller*** **Absorção**	***Chiller*** **Absorção**
Tipo de Condensação		Água	Água	**Ar**	Água	Água
COP	kW/kW	6,018	5,633	2,866	1,000	1,345
IPVL	kW/kW	9,264	8,586	4,758	1,000	1,345
Potência – *Chillers*	kW	263	281	552	1.583	1.177
Referência		***ASHRAE Standard 90.1-2016 SI***				Alta Eficiência
Calor Rejeitado	kW	1.846	1.846	2.135	3.166	2.760
Vazão de Água de Resfriamento	m^3/h	289	291	---	495	432
Altura manométrica – BAC	m.c.a.	17.0	17.0	---	22,0	22,0
Potência – BAC	kW	17.7	17,9	---	39,3	34,3
Potência – Ventilador da Torre	kW	9.2	9.2	---	18,4	15,0
Potência – Queimador	kW	---	---	---	5,5	3,7
Potência Total – Outros	kW	---	---	---	4,0	3,0
Potência Total – Elétrica	kW	289,9	308,1	552,3	67,2	56,0
Vazão de Gás Natural	Nm^3/h				145,4	108,1
Consumo Anual Estimado Energia Elétrica	kWh	626.564	669.857	1.054.003	212.856	177.251
Consumo Anual Estimado Gás Natural	Nm^3	---	---	---	238.722	177.457
Consumo Anual Estimado Água de Reposição	m^3	3.743	3.772	---	6.756	5.890
Consumo Anual Estimado Energia Elétrica	R$	128.364,00	136.977,00	224.740,00	39.339,00	32.759,00
Consumo Anual Estimado Gás Natural	R$	---	---	---	278.473,00	207.006,00
Consumo Anual Estimado Água de Reposição	R$	65.351,00	65.854,00	---	117.968,00	102.839,00
Consumo Anual Estimado Total	**R$**	**193.715,00**	**202.831,00**	**224.740,00**	**435.780,00**	**342.603,00**

Fonte: Elaboração do autor.

dio de carga parcial do sistema de 0,57. Para um caso real, os fornecedores das torres devem informar os valores específicos de taxa de reposição de água. Deve-se observar apenas que a relação da água de reposição deve ser calculada com base no calor rejeitado (que é variável ao longo do ano) e não com base na vazão de água na torre (normalmente um valor fixo). A equação a seguir se refere ao cálculo das perdas por evaporação em uma torre de resfriamento:

$$G_{l0} = \frac{Gl\,(t_1 - t_2)}{1000\,\frac{(h_2 - h_1)}{(x_2 - x_1)} - t_2}$$

Onde:

- **G_{l0} –** Perda de água por evaporação (m^3/h);
- **Gl –** Vazão da água de resfriamento (m^3/h);
- **t_1 –** Temperatura de entrada da água na torre de resfriamento (°C);
- **t_2 –** Temperatura de saída da água na torre de resfriamento (°C);
- **h_1 –** Entalpia do ar na entrada da torre de resfriamento (kJ/kg);
- **h_2 –** Entalpia do ar na saída da torre de resfriamento (kJ/kg);
- **x_1 –** Umidade absoluta do ar na entrada da torre de resfriamento ($g/kg_{ar\ seco}$);
- **x_2 –** Umidade absoluta do ar na saída da torre de resfriamento ($g/kg_{ar\ seco}$);

- Para o cálculo do custo do consumo de energia elétrica, foi utilizada a tarifa Verde de energia elétrica aplicada a instalações comerciais, sistema TUSD, do subgrupo A4 (2,3 kV a 25 kV), para a cidade de São Paulo (AES Eletropaulo), vigente em 01/2017, com os seguintes valores:
  - Demanda = R$ 8,01;
  - Consumo Fora da Ponta = R$ 0,05815;
  - Consumo na Ponta = R$ 0,36894;
- Após o cálculo do custo do consumo de energia elétrica, foram adicionados os impostos (ICMS, PIS e COFINS).
- Para o cálculo do custo do consumo de água, foi utilizada a tarifa aplicada para instalações comerciais normais para a cidade de São Paulo (SABESP) no valor de R$ 17,46/m³ (vigente em 01/2017). Para contratos de demanda firme, com consumo mensal de pelo menos 500 m³/mês o valor da tarifa é menor, conforme apresentado na Tabela 9;
- Não foi considerado o lançamento de esgoto. É importante observar que se houver um medidor

Tabela 9 – Tarifa de consumo de água e esgoto (vigente em 01/2017) para instalações comerciais e industriais na região metropolitana de São Paulo, com contratos de demanda firme (consumo mínimo)

Volume da demanda contratada	Tarifas de água	Tarifas de esgoto
m³/mês	R$/m³	R$/m³
500 a 1.000	14,59	14,59
1.001 a 2.999	13,74	13,74
3.000 a 10.000	12,89	12,89
10.001 a 20.000	12,08	12,08
20.001 a 30.000	11,29	11,29
30.001 a 40.000	10,49	10,49
acima de 40.000	9,65	9,65

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 10 – Tarifa de consumo de gás natural (vigente em 04/2017) para sistemas de refrigeração na região metropolitana de São Paulo.

Classes	Volume	Variável – c/ICMS
	m³/mês	R$/m³
1	Até 5.000 m³	1,282293
2	5.000 a 50.000 m³	1,166515
3	50.000,01 a 100.000 m³	1,107592
4	100.000,01 a 500.000 m³	1,019954
5	500.000,01 a 2.000.000 m³	1,029294
6	2.000.000,01 a 4.000.000 m³	1,002136
7	4.000.000,01 a 7.000.000 m³	0,969748
8	7.000.000,01 a 10.000.000 m³	0,937355
9	> 10.000.000m³	0,904211

Fonte: Elaboração do autor.

de consumo de água dedicado apenas para a água de reposição na torre de resfriamento e outro medidor no dreno, é possível obter a isenção da cobrança da tarifa de esgoto para o valor da diferença;

- Para o cálculo do custo do consumo de gás natural, foi utilizada a tarifa com ICMS aplicada para sistemas de refrigeração para a cidade de São Paulo (Comgás). Para o estudo, foi utilizada a Classe 2 conforme indicado na Tabela 10.

A seguir, alguns comentários sobre o resultado do estudo comparativo:

- A opção 1 foi a melhor (*Chiller* com compressor centrífugo, com motor elétrico e condensação a água);
- Se o contrato de água não tiver isenção da cobrança da tarifa de esgoto, a opção 3 (*Chiller* com compressor parafuso, com motor elétrico e condensação a ar) passa a ser a melhor. Nesse caso, o valor total de gastos para o consumo anual estimado (energia elétrica e água) das opções 1 e 2 seria de R$ 259.000,00 e R$ 269.000,00 aproximadamente;
- Outras opções de fontes de água de reposição para a torre de resfriamento, tais como água de poço ou água de reuso podem diminuir o valor dos custos operacionais com os *Chillers* com condensação a água;
- As opções utilizando *Chillers* com ciclo de absorção se mostraram bem mais onerosas que as demais, o que indica que a aplicação de *Chillers* com queima direta de gás natural, em princípio, não é uma boa opção para aplicações em edifícios comerciais;
- No entanto, os fornecedores de gás natural oferecem contratos de longo prazo e algumas vezes sem nenhum custo de investimento inicial para o fornecimento dos *Chillers*, o que pode tornar essa opção atrativa para o empreendedor, mas ao longo do tempo pode ser onerosa para os usuários do edifício. Nesse caso, é muito importante realizar um estudo do custo total do sistema (ao longo de sua vida útil). Também é importante verificar a tarifa contratual, que pode ser bem menor, mas exige um consumo mínimo de gás, ou que pode ser menor apenas por um período curto de operação (por exemplo, cinco anos). Recomenda-se um estudo do perfil anual de carga térmica do edifício (não superdimen-

sionado) e um contrato tarifário bem definido, válido para a vida útil do sistema;

- No estudo em questão, para a opção 5 ser melhor que a opção 1, o valor da tarifa do gás natural deveria ser de R$ 0,33/Nm³, no máximo, uma vez que as tarifas de consumo de energia elétrica e consumo de água já estão previamente definidas;
- Quando a fonte de energia para aquecimento do gerador do *Chiller* com ciclo de absorção for rejeito de calor de outro processo (cogeração, gases de queima de outro processo, água quente de resfriamento de motores de combustão ou turbinas, queima de resíduos sólidos, etc.), que resulte em custo mínimo, essa pode ser a melhor opção.



2 VANTAGENS DOS SISTEMAS DE ÁGUA GELADA

A primeira definição funcional de ar condicionado foi criada em 1908 e é creditada a G. B. Wilson. É a definição que Willis Carrier, o "pai do ar condicionado", adotou para um sistema que:

- Mantém a umidade em uma faixa adequada ao longo do ano em todas as partes de um edifício;
- Reduz a umidade excessiva do ar durante determinadas épocas do ano;
- Fornece uma taxa constante e adequada de ventilação;
- Remove de forma eficiente micro-organismos, poeira, fuligem e outros corpos estranhos do ar ambiente;
- Resfria de forma eficiente o ar ambiente durante determinadas épocas do ano;
- Aquece ou ajuda a aquecer os ambientes no inverno;
- Não é de custo proibitivo na compra ou manutenção.

A ASHRAE define o termo “ar condicionado” como “o processo de tratamento de ar para atender os requisitos de um espaço condicionado por meio do controle de umidade, temperatura, limpeza e distribuição do ar”. Também da ASHRAE, o termo “ar condicionado para conforto” se refere ao “processo de tratamento de ar para controlar sua temperatura, umidade relativa, limpeza e distribuição para atender os requisitos de conforto dos ocupantes de um espaço condicionado”.

Portanto, durante períodos mais quentes, um sistema de ar condicionado deverá resfriar e desumidificar o ar para manter o ambiente condicionado dentro dos requisitos de conforto dos ocupantes. Durante períodos mais frios, deverá aquecer e umidificar o ar ambiente. E durante todo tempo operacional, o sistema de ar condicionado deverá garantir um nível de limpeza do ar, por meio do uso de filtros apropriados e um sistema de distribuição de ar limpo para o ambiente condicionado.

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

Os requisitos de qualidade do ar interior estão estabelecidos na ***ABNT NBR 16401 Parte 3 – Instalações de Ar Condicionado Sistemas Centrais e Unitários – Qualidade do Ar Interior***, que estabelece os requisitos de filtragem do ar exterior e do ar de recirculação no ambiente condicionado, em função dos elementos contaminantes (externos e internos) contidos no ar e as taxas de renovação de ar mínima, em função da área útil ocupada e da quantidade de pessoas que ocupam o ambiente condicionado.

Deve-se observar que fundamentalmente o condicionamento de ar não se trata apenas do processo de resfriamento de ar. O controle adequado da umidade e o atendimento aos requisitos de filtragem e renovação do ar e sua distribuição no ambiente são mais importantes que o resfriamento. Portanto, para se obter um ambiente condicionado, de acordo com sua definição completa e conforme os requisitos de conforto e saúde humana, é fundamental que sejam atendidos os requisitos estabelecidos pelas normas de referência.

Há muitas discussões sobre quais as melhores alternativas de sistemas de ar condicionado e, em função de apelos comerciais, também há muita confusão.

Tratando-se de sistemas não residenciais, há várias alternativas, porém, em muitos casos instala-se um sistema de ar condicionado por que simplesmente as pessoas acham necessário. Mas isto nem sempre é verdade. A ***ABNT NBR 16401 Parte 2***, que trata de parâmetros de conforto térmico, apresenta a possibilidade de aplicar soluções alternativas utilizando o método do conforto adaptativo, que propiciarão aos usuários um nível de conforto aceitável sem a aplicação de um sistema de ar condicionado com processos de resfriamento e desumidificação.

Por outro lado, quando se aplica um sistema de ar condicionado, muitas vezes na busca de uma solução mais barata e sem a execução de um projeto

adequado, o resultado final pode não atender os requisitos de conforto ambiental e saúde humana.

Outro fato é que o ar condicionado é considerado por muitos o "vilão" do consumo de energia, então se busca um sistema mais eficiente. É muito comum em projetos, mesmo de edifícios de grande porte, a priorização de equipamentos mais eficientes em detrimento do controle adequado para manter o conforto ambiental e dos requisitos mínimos para a qualidade do ar interior, mesmo com impacto negativo à saúde humana.

É óbvio que o objetivo de um sistema de ar condicionado não é economizar energia, mas muitas vezes parece que os fornecedores de serviços e equipamentos de um sistema de ar condicionado e até mesmo o cliente final se esquecem desse detalhe e preferem gastar com equipamentos mais eficientes em vez de investir em um bom projeto, que contenha os controles necessários e elementos que garantam o bom desempenho de um sistema para atender os seus reais objetivos.

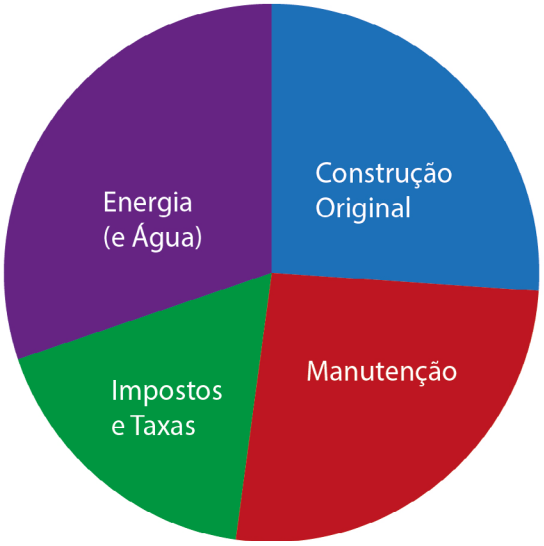
Pode-se dizer que a melhor forma de economizar energia com um sistema de ar condicionado é mantê-lo desligado! Ou ainda, pode-se concluir que, se um sistema de ar condicionado muito eficiente produzir desconforto (normalmente muito frio) ou causar danos à saúde humana, todo o investimento inicial e o consumo de energia "eficiente" será um total desperdício. Portanto, o "vilão" do consumo de energia é aplicação inadequada de um sistema de ar condicionado.

Como resultado, é comum observar sistemas do tipo Split em edifícios comerciais (principalmente em instituições públicas, incluindo escolas e hospitais), que não atendem as mínimas condições de requisitos de filtragem e de renovação de ar, além de normalmente trazerem uma série de desconfortos por causa dos jatos de ar frio na área ocupada pelos usuários do ambiente condicionado. No entanto, muitos dos equipamentos tipo Split possuem o selo de eficiência com nível "A" do PBE (Programa Brasileiro de Eficiência) e, portanto, são aceitos como "sistemas eficientes de ar condicionado".

Entretanto, um sistema de ar condicionado bem projetado para atender os requisitos de conforto ambiental e qualidade do ar interior quando opera de maneira adequada, estará em sua melhor condição de eficiência.

O Gráfico 1 mostra a distribuição dos custos principais de um edifício ao longo de sua vida útil. Este é um gráfico conhecido e o valor percentual de cada componente pode variar um pouco. Há casos verificados nos quais o custo inicial da construção é apenas 15-20% do custo total do edifício para um período de 60 anos de funcionamento.

Gráfico 1 – Distribuição dos custos principais de um edifício ao longo de sua vida útil



Fonte: TOM, 2009.

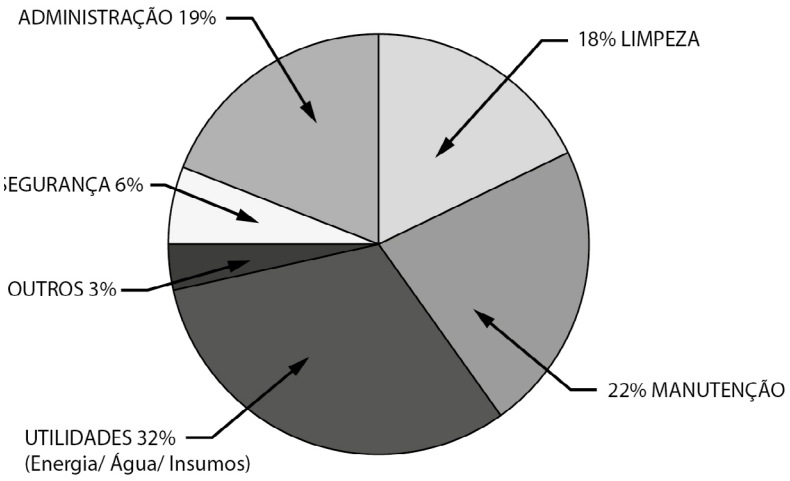
Pode-se observar que as parcelas dos custos operacionais envolvendo principalmente o consumo de energia e demais insumos e os custos de manutenção são os principais.

O Gráfico 2 mostra a distribuição específica dos custos de operação e manutenção de um edifício de escritórios.

Porém, quando se adiciona a parcela de custo relativa aos usuários (ocupantes) do edifício, isto é, dos seus salários, a disparidade é muito grande. Estudos indicam que em um edifício corporativo, quando a parcela dos salários é incluída, ela pode representar mais de 90% do custo total do edifício, como mostra o Gráfico 3.

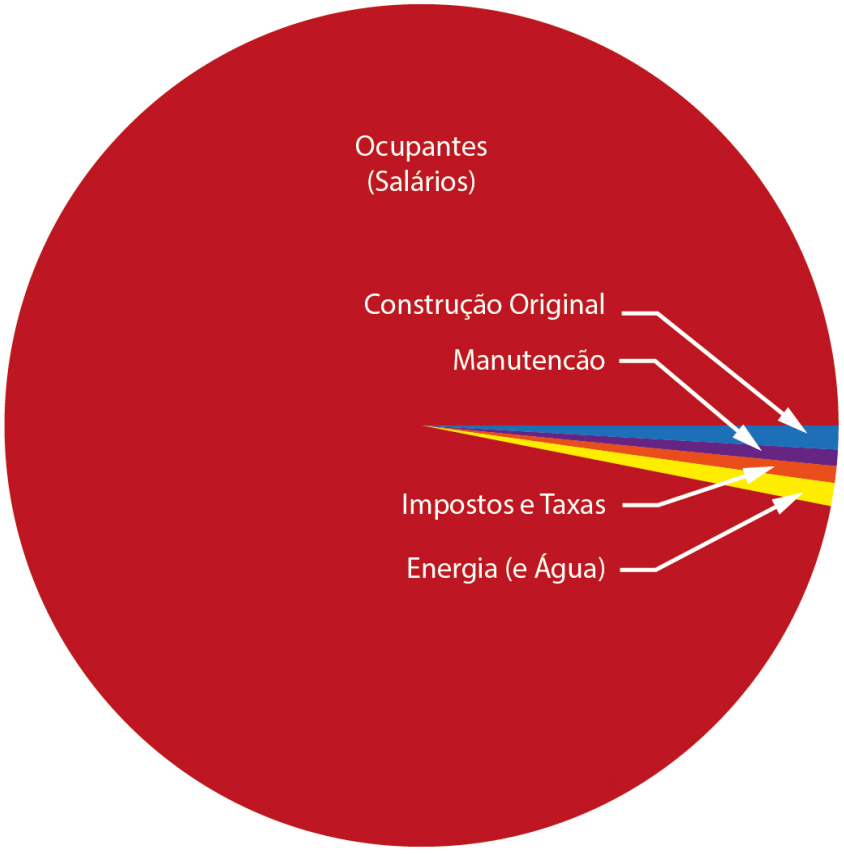
Outra análise importante é a comparação de gastos anuais apresentada na Tabela 11. Bastam apenas 2% de melhoria na produtividade dos usuários (cerca de 9 min/dia) para cobrir os custos de consumo de energia elétrica e manutenção.

Gráfico 2 – Distribuição dos custos de operação e manutenção de um edifício



Fonte: ASHRAE, 2015.

Gráfico 3 – Distribuição dos custos principais de um edifício ao longo de sua vida útil, incluindo os custos dos salários dos usuários



Fonte: TOM, 2009.

Tabela 11 – Gastos anuais de Salários, Energia Elétrica e Manutenção

Gastos	Custo por m²/ano (R$)
Energia Elétrica	100,00
Manutenção	115,00
Salário dos Usuários	17.000,00
2% da Produtividade dos usuários	340,00

Fonte: Elaboração do autor.

A partir desses dados, pode-se verificar que a principal razão da instalação de um sistema de ar condicionado em um ambiente de trabalho é que, ao produzir conforto ambiental e melhorar a qualidade do ar interior, a produtividade dos usuários irá aumentar. E tudo isso vale muito mais para a empresa do que os gastos com operação e manutenção, pois a produtividade dos usuários é o que traz resultados efetivos para uma empresa.

A seguir, algumas considerações sobre a melhoria de 1% na produtividade dos usuários e custos com investimento inicial relacionadas ao sistema de ar condicionado:

- Em seis meses paga-se os custos totais de um projeto de HVAC bem projetado (considerando duas vezes o custo de um projeto barato e ruim);
- Em doze meses paga-se os custos totais da diferença entre um sistema de HVAC bem projetado e executado e um sistema barato e ruim;
- Em três meses paga-se os custos totais da diferença entre um sistema de automação completo e otimizado para o HVAC e um sistema simples e limitado.

A Tabela 12 mostra uma comparação entre níveis de eficiência energética em vários tipos de sistemas ar condicionado mais utilizados em instalações não residenciais, de diversas faixas de capacidade, para edifícios localizados em São Paulo.

Alguns números apresentados na Tabela 12 divergem de valores típicos de mercado. Porém, nesse caso, foi considerado um projeto que atende as

Tabela 12 – Níveis de eficiência energética em sistemas de ar condicionado

Sistema (Faixas Típicas)	Observações	COP Compressor	COP Total do Sitema
Roof-Top/ Self a Ar (10 a 30 ton)	Compressor *Scroll*	2,50 – 2,70	2,10 – 2,35
VRF a Ar (10 a 40 ton)	Compressor *Scroll* – VFD	3,30 – 3,35	2,50 – 3,00
VRF a Água (10 a 40 ton)	Compressor *Scroll* – VFD	3,70 – 4,40	3,00 – 3,70
Chiller a Ar (150 a 400 ton)	Compressor Parafuro/*Scroll*	2,90 – 4,15	2,20 – 3,00
Chiller a Água (150 a 700 ton)	Compressor Parafuso	5,00 – 6,40	3,00 – 3,90
Chiller a Água (300 a 4.000 ton)	Compressor Centrífugo – VFD	5,80 – 7,50	3,70 – 5,50
Sistema de Termoacumulação de Gelo com *Chiller* a Água (250 a 3.000 ton)	Compressor Parafuso Ar Condicionado → Fabricação de Gelo →	4,70 – 5,40 3,20 – 3,90	3,70 – 4,15 2,60 – 2,93
Sistema de Termoacumulação de Água Gelada com *Chiller* a Água (250 a 10.000 ton)	Compressor Parafuso ou Compressor Centrífugo – VFD	5,80 – 7,50	4,70 – 5,80

Fonte: Elaboração do autor.

condições típicas de ar condicionado para um sistema de conforto, com temperatura de bulbo seco de 24,0 °C e umidade relativa de 50% no ambiente condicionado e em conformidade com os requisitos de filtragem e qualidade do ar interior. Para isso, algumas das alternativas listadas necessitam de sistemas de resfriamento e desumidificação complementares, além de ventiladores adequados para o tipo de filtro necessário, os quais foram incluídos nos resultados finais de consumo de energia e de eficiência energética.

Um dos casos mais comuns são os sistemas do tipo VRF que vêm crescendo muito no mercado brasileiro, porém muitas vezes aplicados de maneira incompleta, que não atendem todos os requisitos de conforto térmico e qualidade do ar interior, e sem a instalação de sistemas complementares, o que pode resultar em limitações ao atendimento das normas técnicas e legislação.

Observação:

- VFD indica compressores com inversores de frequência (ou "inverter").
- O COP máximo de 7,50 pode ser obtido em sistemas com *Chillers* em série, resultante da média do COP dos *Chillers*.

A tabela 13 mostra uma comparação entre sistemas do tipo VRF e sistemas de água gelada, abordando vários aspectos a serem considerados não só durante o projeto e instalação ou sobre eficiência energética, mas outros aspectos operacionais de um sistema de ar condicionado. Deve-se ainda observar que esta é apenas mais uma comparação dentre várias apresentadas por defensores de cada um dos sistemas aqui comparados.

Deve-se observar que, em caso de *retrofit* de fluido frigorífico para sistemas do tipo VRF que utilizam R-22, será necessário substituir todo o sistema (incluindo unidades condensadoras, evaporadoras, toda a tubulação e demais componentes) para atender os requisitos de pressão de projeto da ***ABNT NBR 16069:2010***, pois os novos sistemas VRF são utilizam fluidos frigoríficos de alta pressão (ex. R-410A).

Finalmente, apesar de as várias comparações, cada projeto precisa ser avaliado de maneira particular. A contratação de profissionais competentes para a implantação do processo de comissionamento desde a fase da concepção e projeto do sistema de ar condicionado é essencial para que os requisitos de projeto do proprietário (e usuários finais) sejam garantidos até a fase de ocupação do edifício, quando o sistema de ar condicionado será desafiado a atender os seus objetivos.

Tabela 13 – Sistemas do tipo VRF vs. Sistemas de água gelada

Item	Descrição	Sistema tipo VRF	Sistema de Água Gelada
1	Conforto Humano	Parcial, com controle da umidade limitado, e distribuição de ar limitada no ambiente. Umidade Relativa > 60%	Atende plenamente desde que projetado de forma completa.
2	Carga Térmica	Cerca de 15% menor quando (normalmente) não atende os requisitos de umidade relativa.	Atende plenamente desde que projetado de forma completa.
3	Processos de resfriamento, aquecimento, umidificação e desumidificação	De difícil aplicação, devendo ser analisado caso a caso.	Atende plenamente desde que projetado de forma completa.
4	Qualidade Interna do Ar	Parcial – necessita de um sistema dedicado de ar externo com resfriamento e desumidificação, filtragem e distribuição nos pavimentos.	Atende plenamente desde que projetado de forma completa. Sistemas dedicados de ar externo são sempre recomendáveis.

(continua)

Item	Descrição	Sistema tipo VRF	Sistema de Água Gelada
5	Custo Inicial	10% a 15% mais caro do que o sistema de água gelada.	
6	Custo Operacional	Cerca de 15% menor quando (normalmente) não atende os requisitos de umidade relativa.	COP de 4,70 com condensação a água (*Chiller* + Bombas + Torres + *Fan Coils*) e COP de 3,00 com condensação a ar.
7	Capacidade de refrigeração	De difícil aplicação, devendo ser analisado caso a caso.	Distâncias são vencidas no projeto da tubulação e seleção da bomba.
8	Aumento da capacidade de refrigeração	Não é simples. Poderá ser necessário novas linhas e acréscimo de equipamentos.	Fácil de ser atingido com a nova seleção da serpentina e da válvula de controle.
9	Operação em carga parcial	Bom desempenho e controle.	Bom desempenho e controle.
10	Controle dos custos operacionais pelo usuário	Controle total (até para desligar o ar condicionado).	Controle limitado sobre a CAG. Controle somente do condicionador da própria sala.
11	Compatibilidade com Normas e Legislação	Parcial. O projeto deverá ser feito considerando as restrições.	Totalmente compatível.
12	Gerenciamento do Fluido Frigorífico	Há riscos de vazamentos em muitos pontos. Depende muito dos cuidados durante a montagem da tubulação	Simples de ser feito. Probabilidade de vazamento mínima, restrita aos *Chillers*.
13	Carga de Fluido Frigorífico	4 a 15 vezes maior do que um sistema de água gelada convencional.	Novos sistemas com cargas muito reduzidas – até 10 vezes menor que *Chillers* convencionais.
14	Operação pelo usuário	Simples através das mais diferentes interfaces, desde um termostato com controle a um computador.	Em sistemas mais convencionais ainda não é simples para o usuário. Em novas concepções já é bem mais simples, igual ao VRF.
15	Possibilidade de pane	Elevada devido à quantidade excessiva de componentes e partes.	Reduzida – menor quantidade de componentes e partes.
16	Tempo de Vida	Até 15 anos.	Até 25 anos.

Fonte: Elaboração do autor.



3 PROCESSO DE RETROCOMISSIONAMENTO EM SISTEMAS DE AR CONDICIONADO DE EDIFÍCIOS

O retrocomissionamento é o processo de comissionamento a ser realizado em edifícios existentes, que consiste em uma investigação detalhada do sistema, incluindo projeto executivo, instalação e condições de operação e desempenho atuais, a fim de identificar problemas e otimizar o sistema de ar condicionado do edifício.

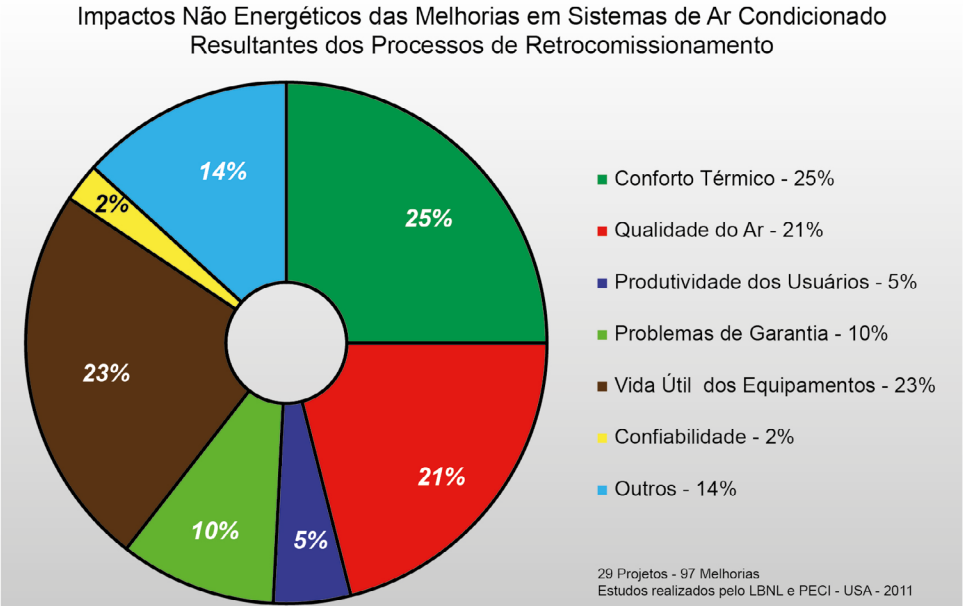
O retrocomissionamento não se trata de um simples diagnóstico energético do sistema, pois tem como principal objetivo recuperar os requisitos de conforto, qualidade do ar e eficiência do projeto. Os processos de auditoria de energia utilizados como referência de análise para projetos de substituição de *Chillers* nem sempre se mostram eficazes, pois muitas vezes todo sistema de ar condicionado está ineficiente, incluindo, equipamentos, controle e operação. Além disso, os projetos de substituição de *Chillers* exigem maiores investimentos e só se viabilizam em edifícios com sistemas obsoletos e muito deficientes.

Já o processo de retrocomissionamento – RCx – se mostra viável mesmo em sistemas com poucos anos de funcionamento. Quanto melhor elaborado o projeto e mais eficiente o conceito do sistema, maiores são as oportunidades de otimização para efetivamente atender os requisitos dos usuários nos ambientes, com aumento significativo da eficiência do sistema e retorno do investimento em prazos muito curtos.

Processos de retrocomissionamento em sistemas de ar condicionado aplicados nos EUA mostraram resultados positivos com aumento da eficiência energética entre 15% e 40% após as medidas de correções, além de impactos não energéticos, alguns mais relevantes, como o conforto térmico, a qualidade do ar interior e a produtividade dos usuários, indicados no Gráfico 4.

O processo de retrocomissionamento ou comissionamento de edifícios existentes é definido pelo ***ASHRAE Guideline 0.2-2015*** – como um *"Processo de gestão da qualidade* para atingir os requisitos atuais das instalações ou sistemas – CFR (do inglês *"Current Facility Requirements"*) – de um edifício existente. O

Gráfico 4 – Impactos não energéticos das melhorias em sistemas de ar condicionado, resultantes dos processos de retrocomissionamento



Fonte: Elaboração do autor com base em estudos realizados pelo LBNL e PECI, 2011.

processo é estruturado em etapas incluindo planejamento, investigação, implementação, verificação e documentação de que as instalações e/ou seus sistemas são operados e mantidos para atender o CFR, com um programa para manter as melhorias por toda vida útil restante dos sistemas".

O ***NEBB Procedural Standards for Retro-Commissioning*** define o retrocomissionamento como "um processo de avaliação, teste, ajuste e correção de sistemas prediais para atender os requisitos atuais do proprietário e para melhorar o conforto e a qualidade dos ambientes além de otimizar a eficiência energética e o uso dos recursos necessários para operação dos sistemas".

Para que o processo tenha sucesso, é essencial que o proprietário esteja comprometido com a visão do retrocomissionamento. Para isso, a Autoridade de Comissionamento precisa ter liberdade para envolver as equipes de operação, manutenção e da administração de *facilities* (administração dos sistemas prediais ou do condomínio) e que eles participem do processo desde o início das atividades.

O processo de retrocomissionamento no sistema de ar condicionado permite a verificação de operação dos componentes sob várias condições e a interação entre os subsistemas (ex. CAG, condicionadores de ar, sistemas de distribuição de ar e o sistema de automação). Além disso, o processo de retrocomissionamento documenta o desempenho do sistema de ar condicionado 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.

A seguir, alguns dos elementos chaves desse processo:

- Montar uma equipe de comissionamento, incluindo os principais envolvidos no processo;
- Envolver as partes interessadas, principalmente proprietários usuários (ocupantes) e equipes de operação e manutenção;
- Desenvolver um plano conceitual do processo de retrocomissionamento;
- Determinar as necessidades funcionais e os requisitos atuais dos sistemas (CFR);
- Documentar o desempenho dos sistemas atuais;
- Realizar as correções óbvias de baixo custo;
- Identificar, analisar e recomendar melhorias;
- Implementar recomendações e melhorias aprovadas;
- Medir e verificar o desempenho e os benefícios;
- Identificar a persistência de (novos) benefícios e melhorias;
- Produzir um manual funcional dos sistemas para operação otimizada;
- Fornecer treinamento ou reciclagem para as equipes de operação e manutenção e para os ocupantes;
- Desenvolver um programa permanente de comissionamento contínuo – OCx (do inglês, *Ongoing Commissioning*).

O processo de comissionamento aqui apresentado está baseado na estrutura definida pelo ***ASHRAE Guideline 0.2-2015 – Commissioning Process for Existing Systems and Assemblies***. A Tabela 14 apresenta o descritivo das atividades de um processo de retrocomissionamento quando executado na sua totalidade.

Tabela 14 – Descrição das atividades de um processo de retrocomissionamento completo

Fase do Processo	Atividades Principais	Entregáveis
Planejamento Inicial	▸ Montar uma equipe de planejamento para o processo de RCx; ▸ Documentar os objetivos e ganhos potenciais do processo de RCx; ▸ Obter as informações sobre as instalações e classificá-las conforme as métricas que serão utilizadas como referência (Plano de M&V); ▸ Desenvolver o plano com o programa do processo de RCx; ▸ Obter a aceitação do proprietário e a decisão de proceder.	▸ Programa do Processo de RCx
Avaliação Inicial	▸ Definir as metas e objetivos do proprietário para o processo de RCx; ▸ Montar a equipe inicial do processo de RCx; ▸ Desenvolver o documento de CFR; ▸ Desenvolver o Plano de RCx; ▸ Estabelecer a estrutura do Manual dos Sistemas; ▸ Realizar a avaliação física inicial do sistema; ▸ Elaborar o relatório da avaliação inicial do sistema; ▸ Obter a aceitação do proprietário e a decisão de proceder.	▸ CFR; ▸ Plano de RCx; ▸ Relatório da avaliação inicial; ▸ Revisão do Programa do Processo de RCx.
Investigação e Análise	▸ Atualizar a equipe do RCx; ▸ Realizar uma reunião de planejamento para a fase de Investigação e Análise; ▸ Revisar os documentos dos sistemas; ▸ Atualizar Plano de RCx; ▸ Realizar investigações e testes em campo relativos aos sistemas; ▸ Realizar a análise dos dados obtidos em campo e identificar as oportunidades de melhorias; ▸ Revisar o relatório de avaliação incluindo o relatório de investigação e análise; ▸ Obter a aceitação do proprietário e a decisão de proceder.	▸ Revisão do Plano de RCx; ▸ Revisão do Plano de M&V; ▸ Revisão do Relatório de avaliação incluindo o relatório de investigação e análise.
Implementação	▸ Elaborar um Plano de Ação para correções e melhorias incluindo o selecionamento das recomendações que serão implementadas; ▸ Atualizar a equipe do RCx; ▸ Incorporar treinamento informal das equipes a partir da implementação do programa; ▸ Atualizar Plano de RCx; ▸ Implementar as recomendações selecionadas; ▸ Implementar projetos de maior investimento (com um novo processo de Cx em paralelo); ▸ Verificar a conclusão das recomendações e realizar os testes de desempenho no sistema; ▸ Atualizar a documentação do processo de RCx; ▸ Obter a aceitação do proprietário e a decisão de proceder.	▸ Plano de Ação de Correções e Melhorias; ▸ Revisão do Plano de RCx; ▸ Revisão do CFR; ▸ Relatório de RCx da fase de implementação.

(continua)

Fase do Processo	Atividades Principais	Entregáveis
Preparação para Operação e Manutenção	▸ Desenvolver um Plano de Comissionamento Contínuo (OCx) ▸ Montar o Manual dos Sistemas; ▸ Treinar as equipes de operação e manutenção dos sistemas e treinar os ocupantes do edifício; ▸ Verificar a eficácia do treinamento; ▸ Realizar um workshop de Lições Aprendidas; ▸ Finalizar o relatório de RCx; ▸ Fornecer os documentos de projeto atualizados ao proprietário; ▸ Obter a aceitação do proprietário e a decisão de proceder.	▸ Relatório final de RCx, incluindo as Lições Aprendidas; ▸ Manual dos Sistemas; ▸ Plano OCx
Comissionamento Contínuo (OCx)	▸ Montar a equipe para o OCx; ▸ Atualizar o Plano de OCx; ▸ Verificar o sucesso da realização dos requisitos do CFR; ▸ Investigar os resultados inaceitáveis; ▸ Implementar recomendações; ▸ Atualizar o Manual de Sistemas; ▸ Atualizar o treinamento das equipes; ▸ Elaborar o relatório de OCx; ▸ Obter a aceitação do proprietário.	▸ Plano de OCx atualizado; ▸ CFR atualizado; ▸ Manual dos Sistemas atualizado; ▸ Relatório de OCx (realizado periodicamente).

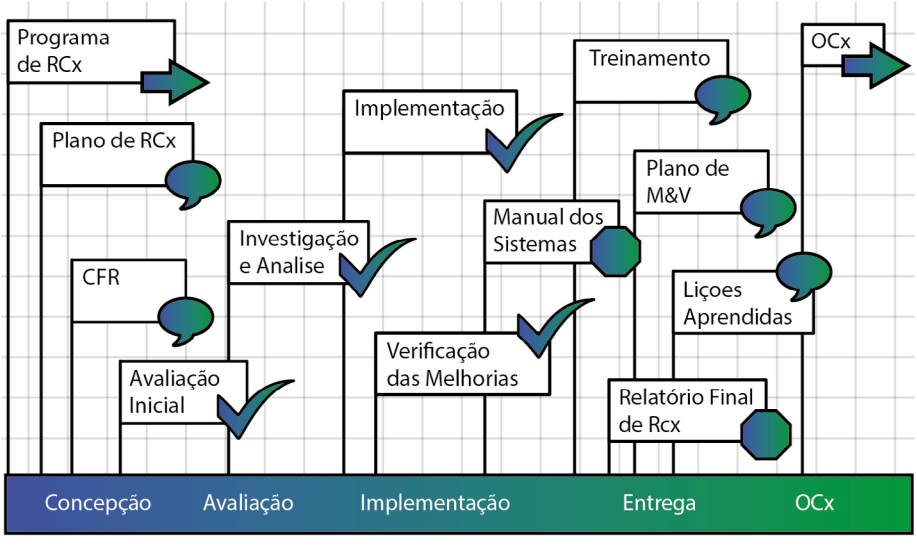
Fonte: ASHRAE, 2015b.

A Figura 1 apresenta as principais atividades durante as diversas fases do processo de retrocomissionamento.

O processo de retrocomissionamento inclui duas atividades iniciais que são chaves para o desenvolvimento e sucesso de todo o processo:

- Revisão de toda a documentação apropriada de uma instalação existente para entender a intenção e propósitos dos projetos anteriores;
- Conduzir entrevistas com a administração, equipes de operações e os usuários dos sistemas para determinar sua perspectiva sobre as condições

Figura 1 – Principais atividades do processo de retrocomissionamento



Fonte: RINDLISBAKER, 2013.

atuais do que lhes é proporcionado, no caso, o conforto ambiental e a qualidade do ar interior;

Uma característica muito importante do processo de retrocomissionamento, que talvez seja uma das maiores diferenças em relação ao processo de comissionamento de novos sistemas, é que o RCx não é um processo linear. As fases e atividades apresentadas na Tabela 14 parecem indicar uma sequência na qual uma atividade precisa ser finalizada para que a seguinte seja iniciada ou que determinada atividade ou fase não precise ser repetida novamente.

Mas a natureza do retrocomissionamento é exatamente oposta. A Figura 2 mostra que se trata de um processo muito iterativo. Haverá condições em que a descoberta de um problema em uma área exigirá que o processo volte a uma atividade anterior e inicie uma nova investigação.

Figura 2 – Fluxograma das atividades do processo de retrocomissionamento e suas iterações



Fonte: MILLER, 2012.

Assim, após o planejamento inicial e a aprovação do programa que define a estrutura do processo de retrocomissionamento para um determinado edifício ou sistema, as etapas são desenvolvidas de maneira dinâmica. Quanto maior o envolvimento das equipes no processo, maior será a efetividade e o sucesso do processo. A seguir um descritivo das principais atividades do processo de retrocomissionamento.

3.1 AVALIAÇÃO INICIAL DO SISTEMA

A fase de avaliação inicial do sistema envolve a definição de todos os objetivos do processo, a formação das equipes de trabalho e a documentação inicial que servirá de referência para a execução do processo de retrocomissionamento. A Figura 3 mostra a sequência de atividades durante a fase de avaliação inicial do sistema.

Os dois principais documentos gerados nessa etapa e que devem seguir em contínuas revisões e atualizações durante todo processo de retrocomissionamento são os seguintes:

3.1.1 FUNCIONALIDADE DO SISTEMA

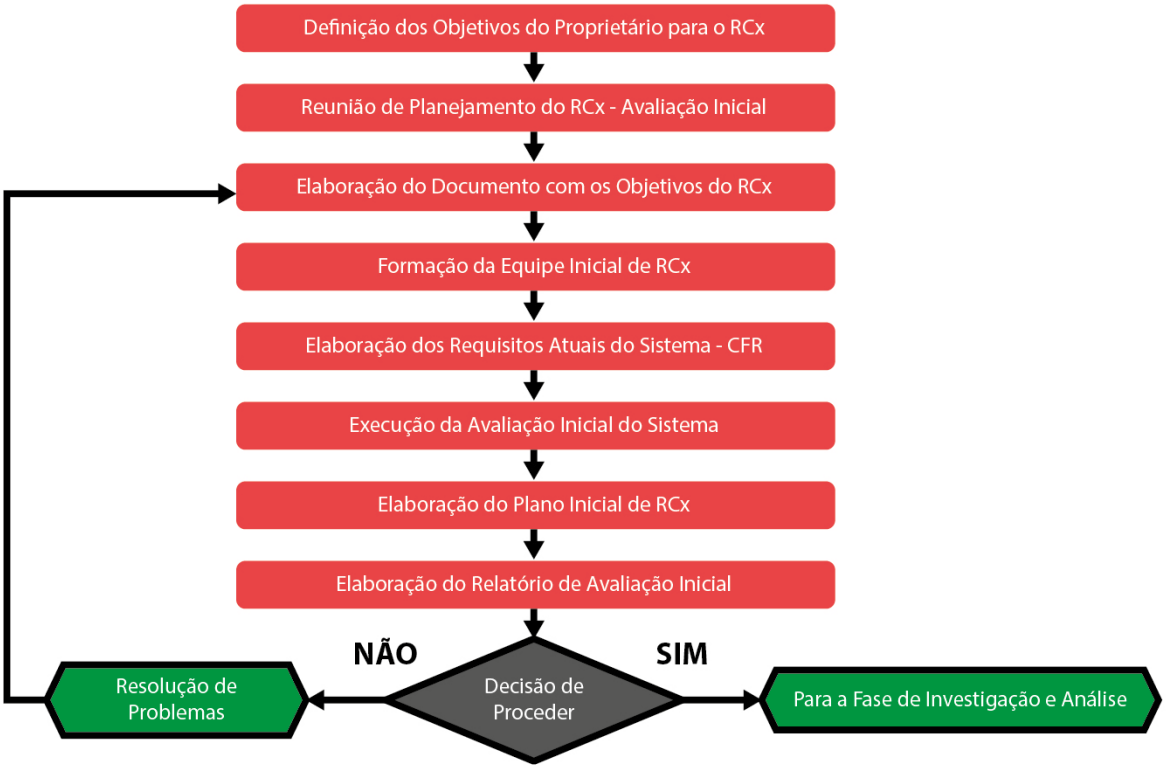
O CFR – documento com os requisitos atuais do sistema (do inglês *Current Facility Requirements*) – é um dos principais documentos de todo o processo de RCx, no qual todos os requisitos atuais do sistema são estabelecidos. Caso a documentação do projeto inicial possua um OPR (requisitos de projeto do proprietário – ver item 3.1.1 do Volume II) ele pode servir de referência para a elaboração do CFR.

Contudo, deverá haver muitas diferenças entre o OPR e o CFR, e as principais são relacionadas aos requisitos dos usuários que podem até ter participado do OPR, mas que certamente terão uma influência maior na elaboração do CFR, pois são os usuários que "habitam" o edifício e sofrem os impactos positivos ou negativos da operação dos sistemas prediais.

Para a elaboração do CFR para um sistema de ar condicionado, são executadas as seguintes atividades:

- Análise dos registros de dados de operação do sistema de ar condicionado;
- Análise dos relatórios do histórico das contas de energia e planilhas de consumos (ou indicadores

Figura 3 – Fluxograma das atividades durante a fase de Avaliação Inicial do Sistema



Fonte: MILLER, 2012.

de desempenho) disponíveis do sistema de ar condicionado;

- Entrevistas com as equipes de engenharia, operação e manutenção do sistema de ar condicionado;
- Entrevistas com os usuários do edifício sobre a percepção e o grau de satisfação em relação ao funcionamento do sistema de ar condicionado para atender o conforto ambiental.

O CFR deverá conter as definições sobre as condições atuais e futuras sobre o sistema de ar condicionado envolvendo:

- Requisitos de conforto ambiental;
- Requisitos de qualidade do ar interior;
- Requisitos de saúde e higiene do ambiente interno;
- Requisitos de ocupação;
- Normas e portarias aplicáveis;
- Adaptabilidade para futuras modificações (incluindo mudança de layout);
- Requisitos de sustentabilidade;
- Requisitos de eficiência energética e desempenho;
- Requisitos de instrumentação para monitoração dos índices de desempenho;
- Requisitos de operação e manutenção dos equipamentos do sistema de ar condicionado (incluindo o sistema de automação);
- Requisitos de treinamento para as equipes de operação e manutenção;
- Requisitos para futuras ampliações do sistema de ar condicionado ou renovação de equipamentos/ instalação.

O CFR deve ser gerado durante a fase inicial e juntamente com o plano de retrocomissionamento serão os documentos principais para o processo de retrocomissionamento. O CFR é um documento vivo

e ativo, pois deve ser revisado e adequado ao longo de todo o processo de retrocomissionamento.

3.1.2 PLANO DE RCx – PLANO DE RETROCOMISSIONAMENTO

O Plano de Retrocomissionamento identifica os processos e procedimentos necessários para que o processo de retrocomissionamento seja bem-sucedido. O Plano de RCx se refere ao CFR e aos demais objetivos do proprietário relativos ao processo de retrocomissionamento.

O Plano de RCx inclui um cronograma de atividades, a descrição detalhada das atividades do processo de retrocomissionamento, responsabilidades dos envolvidos em cada etapa, requisitos de documentação, atividades de campo durante a fase de investigação, relatórios e procedimentos de avaliação.

O Plano de RCx deve ser continuamente revisado e adequado ao longo de todo o processo de retrocomissionamento.

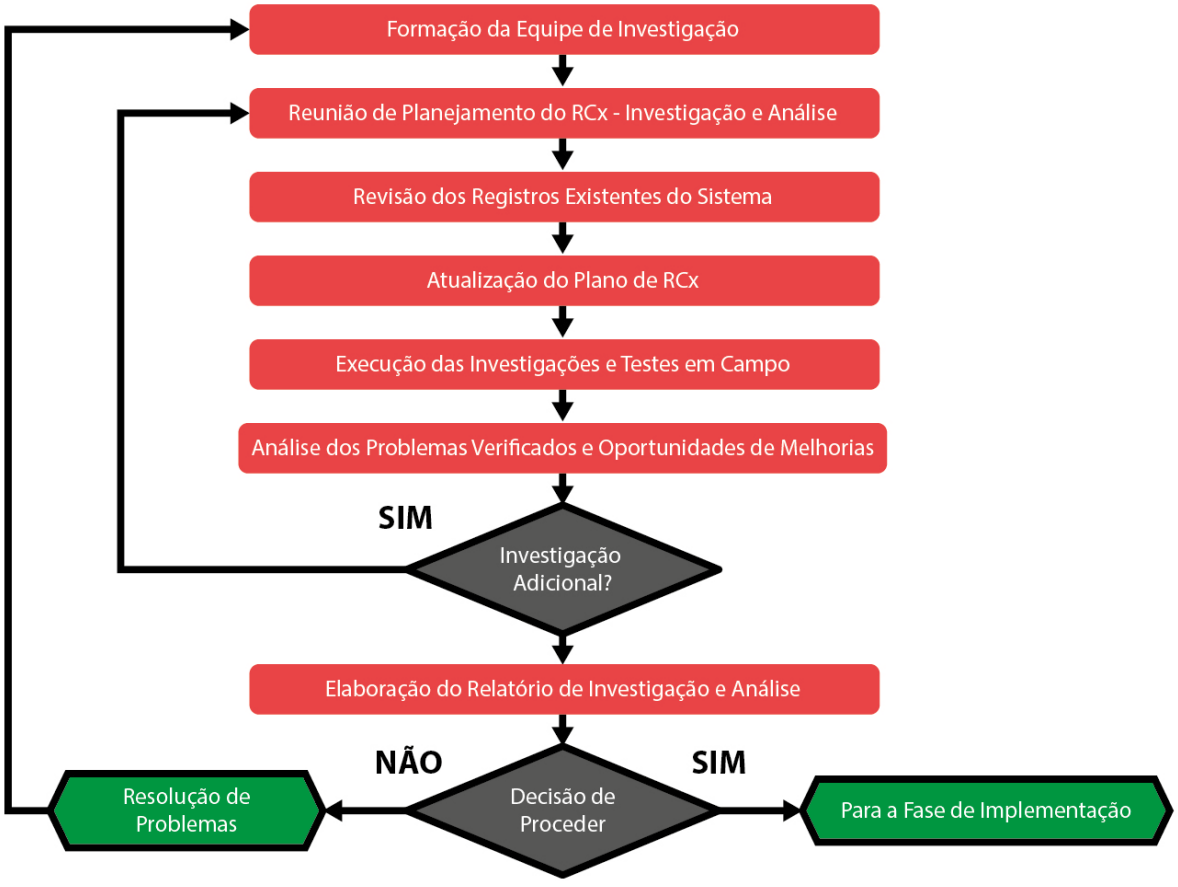
Durante a fase de investigação e análise, o Plano de RCx deve ser utilizado como um guia de referência e, para cada atividade de campo, o planejamento das investigações e testes deve ser previamente analisado.

3.2 FASE DE INVESTIGAÇÃO E ANÁLISE

A Figura 4 mostra a sequência de atividades durante a fase de investigação e análise do sistema quando são realizadas as principais atividades de campo.

Diferente de um processo de comissionamento de um novo sistema, o objetivo das atividades da investigação em campo é mais amplo do que verificar as

Figura 4 – Fluxograma das atividades durante a fase de Investigação e Análise do Sistema



Fonte: MILLER, 2012.

condições de operação em campo e o desempenho dos equipamentos e do sistema em relação ao OPR e o BoD (ver itens 3.1.1 e 3.2.1 do Volume II). Justamente por se tratar de um processo investigativo, o foco das atividades é identificar desvios operacionais, as suas causas e os impactos no restante do sistema. Além disso, as buscas por oportunidades de melhorias devem ser orientadas para a otimização dos sistemas e, no caso do ar condicionado, primeiramente o conforto térmico dos ocupantes e a qualidade do ar dos ambientes climatizados, e em seguida a eficiência energética do sistema.

A seguir, um resumo das atividades de investigação em campo para um sistema de ar condicionado:

3.2.1 INVESTIGAÇÃO EM CAMPO – VERIFICAÇÃO DA INSTALAÇÃO

Nesta etapa, a instalação é verificada envolvendo os seguintes aspectos:

- Equipamentos – os equipamentos instalados são verificados em conformidade com o projeto atual. Devem ser verificados os dados de placas e as características de operação e as suas interligações mecânicas e elétricas, além das interfaces com a automação. É muito comum haver alterações das características atuais dos equipamentos sem revisão da documentação de projeto de maneira adequada;
- Instalação – todos os componentes são verificados e comparados com o projeto atual. A funcionalidade dos componentes da instalação deve ser verificada nos modos de operação automática e manual e deve incluir válvulas e dispositivos de bloqueio, elementos de regulagem e balanceamento, elementos de controle, instrumentação de campo e comandos de automação. É muito comum não haver um programa de manutenção adequada para muitos dos componentes da instalação e, como consequência, o desempenho do sistema pode ser muito afetado;
- Tubulação e Rede de Dutos – as tubulações hidráulicas, os circuitos de refrigeração e rede de dutos de ar são verificados e comparados com o projeto atual, incluindo a posição de instalação dos instrumentos de campo e acessos para manutenção;
- Verificação do sistema de automação envolvendo os seguintes aspectos:
  - Número de pontos fornecidos e qualificação do hardware fornecido;
  - Qualidade da instrumentação de campo instalada;
  - Certificados de calibração dos instrumentos;
  - Rotinas de controle de acionamento dos equipamentos;
  - Funcionalidade das telas do sistema de automação.

Ao final da etapa de verificação da instalação, é gerado um relatório da análise com os resultados obtidos, onde serão apontados os desvios e identificados os possíveis problemas de instalação (montagem) que impedem ou limitam o funcionamento otimizado do sistema, bem como as medidas de correção para se obter uma operação otimizada.

A partir dos resultados da verificação de instalação, o Plano de RCx deve ser reavaliado e eventualmente revisado para a sequência das investigações, principalmente se houver algum resultado que impacte ou limite as próximas atividades.

3.2.2 INVESTIGAÇÃO EM CAMPO – VERIFICAÇÃO DA OPERAÇÃO

Nesta etapa são realizados verificações e testes operacionais nos principais equipamentos e sistemas. A seguir, um descritivo das atividades típicas:

Sistema de Água Gelada:

- Verificação dos ajustes e balanceamento do sistema de distribuição de água gelada e água de resfriamento dos equipamentos envolvidos;
- Execução dos testes operacionais das bombas de água gelada nas condições de operação após o balanceamento hidrônico nos *Chillers*;
- Execução dos testes operacionais das bombas de água de resfriamento nas condições de operação;
- Execução dos testes operacionais das torres de resfriamento nas condições de operação, para verificação da capacidade máxima e comparação com as condições de projeto;
- Execução dos testes operacionais dos *Chillers* nas condições de operação;

- Simulação das rotinas de operação normal e situações de alarme da CAG para verificação de intertravamentos, sinalizações, mensagens de alarme, atuações do controlador.

Sistemas de Ventilação, Exaustão e Distribuição de Ar:

- Verificação dos ajustes e balanceamento do sistema de ventilação, exaustão e distribuição de ar, envolvendo ar externo, ar tratado/insuflado, exaustão (sanitários, cozinhas, etc, quando atuando em conjunto do sistema de ar condicionado) pressurização de escadas, incluindo todos os dispositivos de regulagem e controle;
- Execução dos testes operacionais dos principais condicionadores de ar, nas condições de operação;
- Execução dos testes operacionais dos ventiladores dos sistemas de ventilação mecânica (insuflamento e exaustão), nas condições de operação;
- Monitoramento das condições operacionais (temperatura/umidade relativa) nos ambientes críticos definidos pelo cliente no CFR.

Ao final da etapa de verificação da operação, é gerado um relatório da análise com os resultados obtidos, no qual serão apontados os desvios e identificados os possíveis problemas operacionais dos equipamentos e do sistema que impedem ou limitam o funcionamento otimizado do sistema.

3.2.3 INVESTIGAÇÃO EM CAMPO – VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO

Nesta etapa são realizados verificações e testes de desempenho nos principais equipamentos e sistemas. A seguir, um descritivo das atividades típicas:

- Testes de desempenho dos *Chillers*;
- Testes de desempenho dos principais condicionadores de ar do sistema;
- Teste de desempenho funcional do sistema de ar condicionado operando sob o controle do sistema de automação. Esse teste é uma avaliação de operação real do sistema de ar condicionado.

Os testes de desempenho dos *Chillers* e condicionadores de ar também possuem objetivos diferentes do que os testes de aceitação durante a fase de TAB em um novo sistema. Em caso de resultados negativos, o principal foco é na verificação dos impactos para o restante do sistema e quais as medidas de correções efetivas necessárias.

Em caso de processos de substituição de *Chillers* antigos, é importante realizar o teste de desempenho com monitoração de dados e, se possível, em várias condições de carga parcial. Os dados resultantes serão importantes para uma análise comparativa mais criteriosa em relação aos novos *Chillers*, (por exemplo, do tipo SPLV – ver item 5.4 do Volume I), com a utilização de parâmetros de desempenho reais dos equipamentos existentes, normalmente piores que os valores do projeto inicial dos *Chillers* antigos.

É muito importante que os testes de desempenho dos condicionadores de ar (normalmente realizado por amostragem) sejam realizados nos períodos mais quentes do ano e com monitoração de dados. Considerando como exemplo um condicionador de ar que atende um pavimento típico de um edifício, com taxa de ocupação plena, alguns resultados podem ser muito importantes para a análise do ambiente, tais como:

- A capacidade de resfriamento do condicionador de ar verificada no período mais quente do dia será a carga térmica de pico real atual do pavimento;
- As condições do ar de insuflamento e de retorno indicarão o ganho de umidade (absoluta) e a relação de carga sensível/latente do ambiente;
- O teste pode incluir ainda a monitoração simultânea das condições do ar externo para a avaliação da taxa de renovação de ar externo e a qualidade do ar interior;
- Além disso, caso algum condicionador estiver com problemas de desempenho, o teste irá indicar os impactos no sistema de água gelada.

3.2.4 REVISÃO DO PLANO DE MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO (M&V)

O Plano de M&V deve ser incluído já no programa inicial do processo de retrocomissionamento e é parte integrante do Plano de RCx. Porém, durante a fase de investigação e análise, a partir dos testes

de operação e desempenho dos equipamentos e sistemas é que serão criadas as bases de referência (*baseline*) para comparação de ganhos após a implementação das medidas de correção e melhorias.

O Plano M&V deve incluir os detalhes dos testes que serão necessários para quantificar o desempenho e os benefícios resultantes das melhorias.

Quando forem exigidos protocolos específicos de M&V, o Plano M&V deve incluir os meios e métodos específicos necessários para cumprir com os requisitos do protocolo.

3.2.5 FASE DE IMPLEMENTAÇÃO DAS MEDIDAS DE CORREÇÃO E MELHORIAS

Ao final do processo de investigação e análise, é gerado um relatório com os resultados obtidos, no qual também são apontados os desvios e identificados os possíveis problemas de projeto, instalação e operação que impedem ou limitam o funcionamento otimizado do sistema, bem como as medidas de correção e oportunidades de melhorias para se obter uma operação otimizada.

3.3 FASE DE IMPLEMENTAÇÃO DAS MEDIDAS DE CORREÇÃO E MELHORIAS

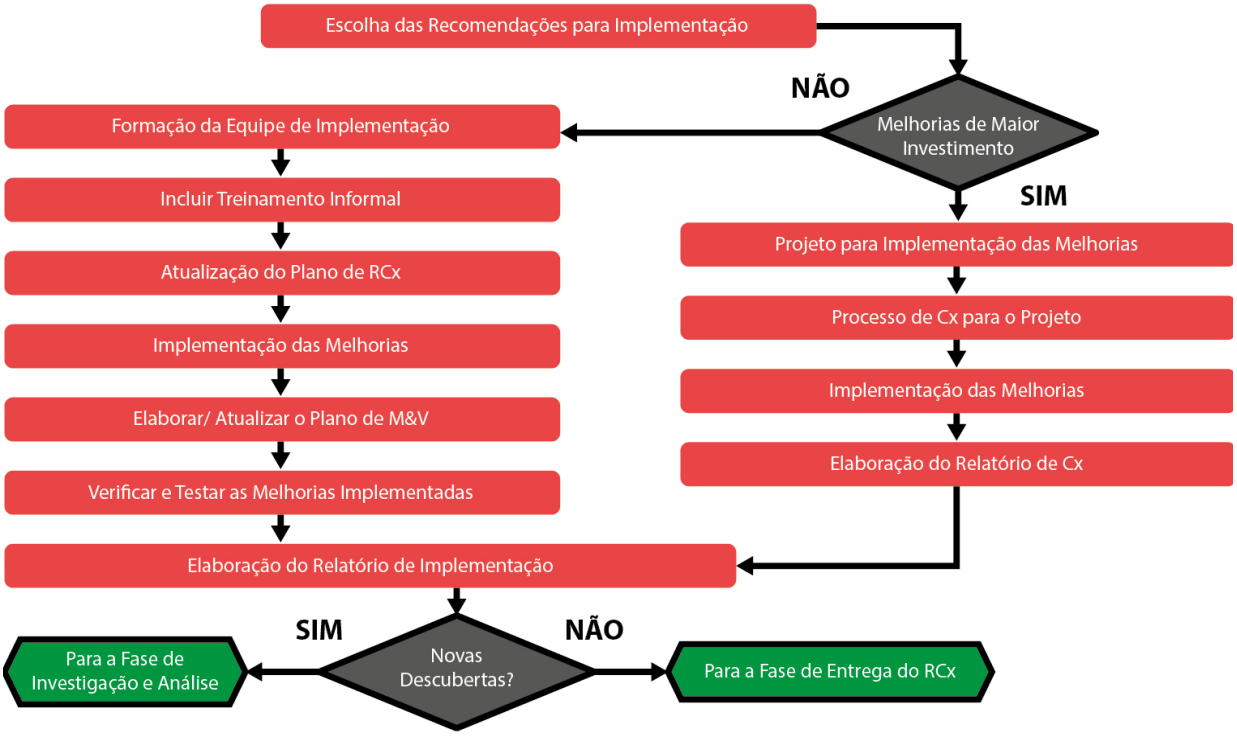
A partir da análise dos resultados da avaliação inicial e das investigações de campo, a equipe de RCx em conjunto com o proprietário seleciona as medidas de correções e melhorias que serão implementadas. A Figura 5 mostra a sequência de atividades durante a fase de implementação das medidas de correção.

A seguir, um resumo das principais atividades dessa fase:

3.3.1 PLANO DE AÇÃO PARA CORREÇÕES E MELHORIAS

O plano de ação para implementação das medidas de correção e melhorias inclui a seleção das

Figura 5 – Fluxograma das atividades durante a fase de Implementação das Medidas de Correção e Melhorias



Fonte: MILLER, 2012.

medidas em função das prioridades e índices de retorno de investimento, a partir de uma lista de prioridades desenvolvida em conjunto com o proprietário. O plano deve ainda incluir as especificações e requisitos necessários para a implementação, as estimativas de investimentos, o cronograma de implantação e os impactos sobre a operação do sistema existente (quando houver necessidade de intervenção de maior porte no sistema ou projetos de maior investimento).

3.3.2 ATUALIZAÇÃO DO PLANO DE RCx

É importante observar que, a partir da fase de implementação, é essencial que se faça uma atualização do Plano de RCx, em função das atividades de correção e melhorias, que serão efetivamente conhecidas apenas ao final da fase de investigação e análise.

A Figura 5 indica dois caminhos do processo:

- Para as medidas de correção de menor impacto no sistema e, normalmente, de menor investimento, onde não é necessário um novo projeto, a fase de implementação continua sendo conduzida dentro do processo de retrocomissionamento e o Plano de RCx revisado é o documento guia nessa fase;
- Para medidas melhorias de maior investimento (por exemplo, de substituição de vários equipamentos, de renovação da CAG ou de todo sistema de ar condicionado), um novo projeto deverá ser gerado e será iniciado em paralelo um processo de comissionamento (conforme capítulo 3.0 do Volume II), específico para esse projeto.

Deve-se observar que, mesmo para as medidas de correção de menor impacto, a estrutura do processo de comissionamento deve ser aplicada durante a fase de implementação, pois se tratam de mudanças no sistema atual. A seguir as principais atividades de comissionamento que devem ser consideradas durante a fase de implementação:

- Os documentos de CFR e Plano de RCx deverão ser os documentos guias durante essa fase e deverão ser atualizados sempre que necessário;
- Os documentos de referência dos novos equipamentos e/ou componentes (dados técnicos e características de desempenho) que serão instalados deverão ser revisados conforme os requisitos de desempenho estabelecidos no CFR;
- Realizar visitas periódicas de verificação sobre a implementação das medidas com reuniões de evolução das atividades;
- Criar e manter atualizados os registros de problemas e soluções durante as obras em campo;
- Verificar os resultados das melhorias e o desempenho alcançado por meio dos testes de campo.

3.3.3 PLANO DE M&V

O Plano de M&V deve ser atualizado com base no escopo de trabalho para medidas de melhorias a serem implementadas.

O proprietário deve rever e aceitar o Plano M&V atualizado antes da implementação.

Após os novos testes, os resultados das análises de M&V concluídas deverão ser anexadas ao Plano de M&V. Isso inclui os benefícios quantificados das medidas de correção e melhorias implementadas e os resultados de todos e quaisquer testes realizados como parte dos requisitos de M&V.

É importante observar que algumas das medições e verificações requerem períodos mais longos ou que nem sempre podem ser realizadas logo ao final da implementação. Os casos típicos são os que requerem verificações durante o período de verão. Portanto, ao final da fase de implementação, o Plano de M&V deverá ser atualizado para indicar quais itens dos requisitos de M&V foram concluídos e o que será concluído no futuro.

Deverão ainda ser fornecidos às equipes de operação treinamentos de capacitação e a documentação de testes (incluindo os procedimentos de teste e formulários de dados em branco) para uso futuro e contínua monitoração e verificação dos resultados.

Finalmente, é extremamente recomendável que sejam implementadas M&Vs no sistema de automação e controle, com a aplicação de gráficos de tendências e valores de *benchmark* para os principais índices de desempenho do sistema de ar condicionado, tais como temperatura e umidade relativa nos ambientes, índices de qualidade do ar (taxa de renovação de ar, monitoração da concentração de CO_2 no ambiente), COP dos *Chillers* e de toda CAG, *W* nos

trocadores dos *Chillers* e nas bacias das torres de resfriamento, temperatura de alimentação de água gelada para os circuitos secundários.

3.3.4 TREINAMENTO INFORMAL

As equipes de operação e manutenção deverão estar diretamente envolvidas com as atividades do RCx durante a fase de implementação, especialmente durante os testes de desempenho e nas atividades de medição e verificação, o que lhes servirá de treinamento informal para operarem os sistemas após as melhorias serem implementadas.

Esse envolvimento também estabelecerá uma compreensão funcional do desempenho esperado do sistema, que servirá de referência para a identificação de desvios que indicam a degradação do desempenho e na adoção de medidas de manutenção contínua para garantir a persistência do desempenho.

O nível de envolvimento dependerá em grande parte dos tipos de medidas de correção e melhorias implementadas e dos métodos escolhidos para implementação (por exemplo se a implementação será por empresa contratada ou pelas equipes internas).

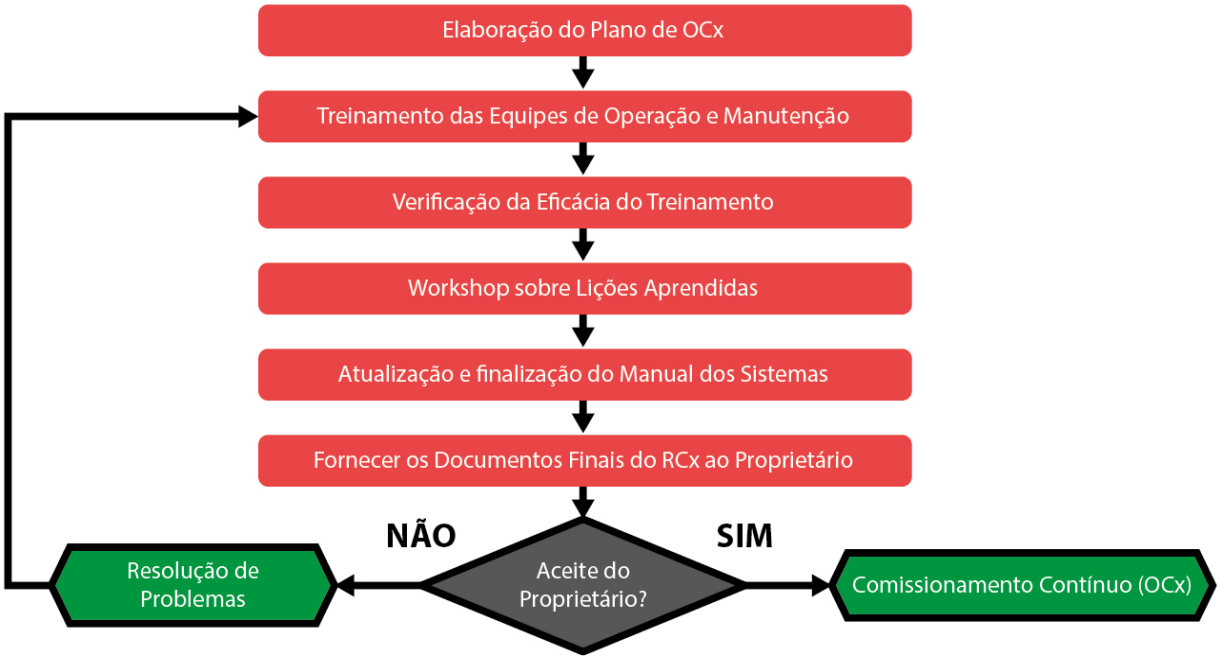
A intenção do treinamento informal durante a implementação é de aumentar a conscientização das equipes técnicas sobre o processo de implementação e trazer o aprendizado sobre os métodos usados para verificar o desempenho.

O envolvimento nessa fase ajuda a criar nas equipes técnicas uma cultura de comissionamento como uma ruptura com os procedimentos operacionais padrões, onde a ênfase é apenas no funcionamento dos equipamentos e na manutenção dos componentes para mantê-los operantes. A partir de agora, a ênfase será na operação e manutenção otimizada dos equipamentos e sistema para atender os requisitos do CFR.

3.4 FASE DE ACOMPANHAMENTO FINAL E PREPARAÇÃO DAS EQUIPES DE OPERAÇÃO (FASE DE ENTREGA DO RCx)

A Figura 6 mostra a sequência de atividades da fase de acompanhamento final e preparação das equipes de operação, que é a fase de entrega do RCx,

Figura 6 – Fluxograma das atividades durante a fase de acompanhamento final e preparação das equipes de operação



Fonte: MILLER, 2012.

caracterizada pela transição de controle do processo de RCx da equipe de RCx para as equipes de operação e manutenção que deverão manter o sistema otimizado durante o restante de seu ciclo de vida.

Durante a fase de entrega do RCx, a equipe de RCx trabalha para garantir que a documentação necessária no relatório final de RCx tenha sido concluída e seja consistente com o programa inicial de RCx e o plano de RCx.

Os objetivos principais da fase de entrega são os seguintes:

- Fornecer os documentos completos do RCx ao proprietário;
- Fornecer treinamento às equipes de operação e manutenção;
- Fornecer treinamento específico aos usuários (ocupantes do edifício);
- Incorporar as lições aprendidas no processo de RCx aos procedimentos diários de operação e manutenção do sistema.

A seguir, um resumo das atividades para a fase de acompanhamento final e preparação das equipes de operação:

3.4.1 PLANO DE COMISSIONAMENTO CONTÍNUO (OCx)

O comissionamento contínuo (OCx – sigla do termo em inglês *Ongoing Commissioning*) é a etapa final do processo de retrocomissionamento, e que de fato se trata de um reinício do processo, que se espera seja contínuo, com o foco na persistência dos resultados e na busca de novas oportunidades de melhorias no sistema. Durante a fase de entrega do processo de RCx, é essencial o planejamento para o OCx.

O Plano de OCx documenta como o desempenho do edifício será monitorado, quais sistemas serão incluídos, quais parâmetros serão rastreados e como as falhas identificadas serão corrigidas.

O Plano de OCx deve ser elaborado durante a fase de entrega do RCx e deve ser apresentado e discutido durante o *workshop* de lições aprendidas.

O Plano de OCx aborda os seguintes aspectos principais:

- Medidas de correção e melhorias restantes a serem implementadas;
- Testes que foram postergados durante a fase de implementação;
- Acompanhamento dos projetos de maior investimento ainda remanescentes;
- Manutenção do CFR para refletir as mudanças operacionais do sistema de ar condicionado;
- Manutenção do manual dos sistemas para refletir as mudanças no CFR e as mudanças físicas e operacionais do sistema de ar condicionado;
- Monitoração contínua e avaliações periódicas do desempenho do sistema para verificar o cumprimento do CFR e a manutenção dos índices de *benchmark* previamente estabelecidos;
- Procedimentos necessários para manter os índices de desempenho do edifício.
- Treinamento contínuo das equipes técnicas e ocupantes sobre os requisitos do CFR sobre o sistema de ar condicionado;
- Procedimentos necessários para satisfazer os requisitos de medição e verificação.

3.4.2 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.

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.

Para os edifícios existentes, o Manual dos Sistemas deve conter as informações necessárias para compreender, operar e manter os sistemas prediais de uma edificação e para informar aqueles que não estão envolvidos no processo RCx sobre o histórico de projeto e as características atuais dos sistemas.

Caso o edifício não possua um Manual dos Sistemas gerado durante o projeto e a construção do edifício, ele deve ser concebido desde a fase de avaliação inicial do processo de RCx e montado ao longo da evolução das demais fases, para incorporar as alterações que ocorreram nos sistemas durante o RCx.

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

A organização específica e do Manual dos Sistemas deve ser adaptada para atender aos requisitos do proprietário. O escopo do Manual dos Sistemas e os procedimentos para sua elaboração são apresentados no ***ASHRAE Guideline 1.4 – 2014*** (ver item 3.2.2 do Volume II).

Os itens fundamentais a serem incluídos no Manual dos Sistemas durante o processo de RCx são os seguintes:

- CFR;
- Plano de RCx;
- Documentos entregues durante as fases do processo de RCx;
- Dados de operação e manutenção dos equipamentos e componentes fornecidos pelos fabricantes sobre as alterações ocorridas durante o processo de RCx;
- Informações de projeto e construção sobre as alterações ocorridas no sistema durante a fase de implementação;
- Manuais de operação revisados;
- Relatórios de Medição e Verificação;
- Programas e registros de treinamento;
- Relatório final de RCx.

3.4.3 TREINAMENTO DAS EQUIPES

É essencial para o sucesso do processo de RCx fornecer o treinamento adequado para as equipes de operação e manutenção e aos ocupantes do edifício com as informações pertinentes sobre como devem ser operados e mantidos os sistemas de modo a atender o CFR.

As equipes de operação e manutenção devem ser treinadas para conhecer as correções e melhorias implementadas e as novas condições de operação do sistema. É importante apresentar-lhes, de maneira detalhada, o manual de sistemas e instruí-los sobre como mantê-lo atualizado ao longo da vida útil dos sistemas.

Deve-se observar que muito mais do que um simples treinamento operacional, o treinamento resultante do processo de RCx implicará em mudanças de conceitos, abandono de vícios operacionais (muitas vezes errados, por falta de fundamentos adequados) e nova cultura orientada a operação otimizada do sistema.

Também é fundamental criar um programa de treinamento para educar os ocupantes sobre os sistemas prediais que eles utilizam (ar condicionado, iluminação, elevadores, sistemas hidráulicos-sanitários) e confirmar que eles compreendem o impacto de suas ações sobre esses sistemas.

Será necessário ainda verificar a eficácia do treinamento dentro de um período razoável após a conclusão de cada programa de treinamento. O ***ASHRAE Guideline 0.2 – 2015*** fornece um material de referência com métodos de verificação e avaliação sobre a eficácia dos treinamentos aplicados.

Toda documentação e materiais aplicados durante o treinamento devem ser compilados e inclusos no Manual dos Sistemas.

3.4.4 *WORKSHOP* SOBRE LIÇÕES APRENDIDAS

Após a conclusão do treinamento e a atualização do manual de sistemas, deverá ser realizado um *workshop* sobre as lições aprendidas incluindo todos os principais envolvidos durante as várias fases do processo de RCx

O *workshop* sobre as lições aprendidas fornece um fórum no qual a equipe do RCx deve discutir as questões que afetaram a operação e manutenção dos sistemas e o conhecimento adquirido durante a implementação das medidas de correção e melhorias.

A discussão deve examinar a execução do processo de RCx e os problemas encontrados que afetaram o funcionamento dos sistemas. A intenção da discussão é determinar melhorias tanto no processo de RCx como na operação dos sistemas após a implementação das medidas de correção e melhorias.

Outro objetivo é o de fornecer recomendações para a continuidade do processo, na fase de OCx, e melhorar todos os esforços de comissionamento futuro.

Os resultados do *workshop* sobre as lições aprendidas devem ser apresentados em um relatório de aprendizagem, que ajudará a facilitar a transferência de conhecimento adquirido durante o processo de RCx.

3.5 COMISSIONAMENTO CONTÍNUO (OCx)

A Figura 7 mostra que a fase do comissionamento contínuo é um reinício das atividades do processo de RCx, que se repete ao longo da vida útil dos sistemas.

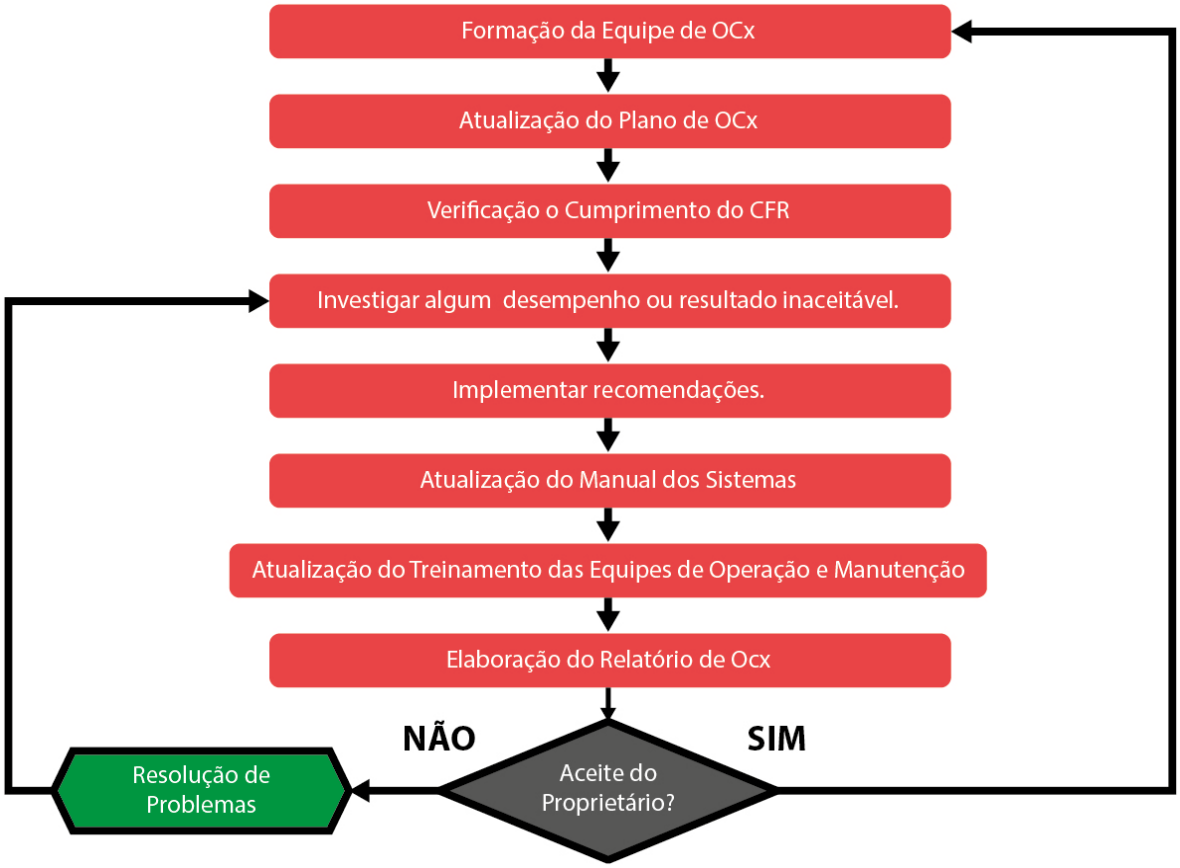
O OCx trata da implementação de um programa para preservar e aumentar as melhorias implementadas durante as fases anteriores do processo de RCx, além de buscar oportunidades para melhorar continuamente a qualidade e o valor dos sistemas prediais durante a sua vida útil.

O programa de OCx é cíclico, pois repete as atividades do RCx periodicamente para garantir que o edifício e seus sistemas sejam avaliados continuamente em relação aos requisitos atuais dos sistemas (CFR) atualizados dinamicamente.

O Plano de OCx inclui procedimentos formais para melhorar continuamente o valor, a qualidade, a funcionalidade e o desempenho dos sistemas prediais. O Plano de OCx deve ser atualizado dinamicamente para a vida do edifício, incluindo *benchmarks*, com novos valores de referência para estabelecer a persistência no atendimento ao CFR.

O objetivo geral do programa de OCx é garantir que os benefícios obtidos com o processo de RCx e futuras correções e melhorias sejam mantidas ao longo

Figura 7 – Fluxograma das atividades durante a fase de Comissionamento Contínuo



Fonte: MILLER, 2012.

do tempo e otimizadas sempre que possível. O OCx envolve a execução de atividades críticas do processo repetidamente ao longo de uma série de ciclos com períodos que duram tipicamentede meses a anos.

3.6 EXPERIÊNCIAS DE CAMPO

A seguir alguns resultados verificados em processos de retrocomissionamento (de edifícios existentes) realizados no Brasil, em sistemas de ar condicionado de edifícios com cerca de três a cinco anos de operação, que obtiveram classificações elevadas em processos de certificação de edifícios sustentáveis:

- Desempenho energético do sistema de ar condicionado, em média 25% abaixo dos valores de projeto;
- Sistema de automação parcialmente entregue;
- Lógicas limitadas ou incompletas, o que requer a desativação do modo automático e força a operação manual remota;
- *Setpoints* alterados de maneira inadequada;
- Sistema em funcionamento (muitas horas) fora do horário de ocupação devido à programação horária inadequada. Equipamentos funcionando fora do horário normal. *Chillers* e demais equipamentos funcionando em ciclos excessivos de partida e parada;
- Sensores descalibrados, mal instalados, invertidos ou em falha. Muitos dos quais são elementos de controle;
- Telas de gráficos de tendência das grandezas operacionais desativadas. São raros os sistemas de automação que possuem telas de gráficos de tendências ativos e que são utilizados pelos operadores do sistema para otimização do sistema;
- Ciclos economizadores inoperantes;
- Tomadas de ar externo fechadas;
- Ventiladores de ar externo desligados;
- *Chillers* com baixa carga de fluido refrigerante;
- Inversores de frequência mal controlados;
- Motores operando com 60 Hz desnecessariamente;
- Circuito secundário com vazão superior ao circuito primário (Síndrome de baixo ΔT);
- Torres de resfriamento com controle inadequado, operando com 29,5 ºC, mesmo no inverno em SP;
- Empresas de manutenção desconhecem requisitos de operação e eficiência dos equipamentos;
- Operadores desconhecem os manuais dos sistemas;
- Operadores sem treinamento adequado e sem conhecimento técnico para operar o sistema;
- Reclamações dos usuários quanto ao conforto térmico;
- Difusores de insuflamento bloqueados pelos usuários;
- Usuários requerem operação manual do ar condicionado;
- Erros de Projeto;
- Erros de Instalação.

A seguir alguns resultados de experiências de campo durante a fase de investigação e análise realizada em sistemas de água gelada.

3.6.1 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE ÁGUA GELADA EM SISTEMA COM BAGPs DEDICADAS

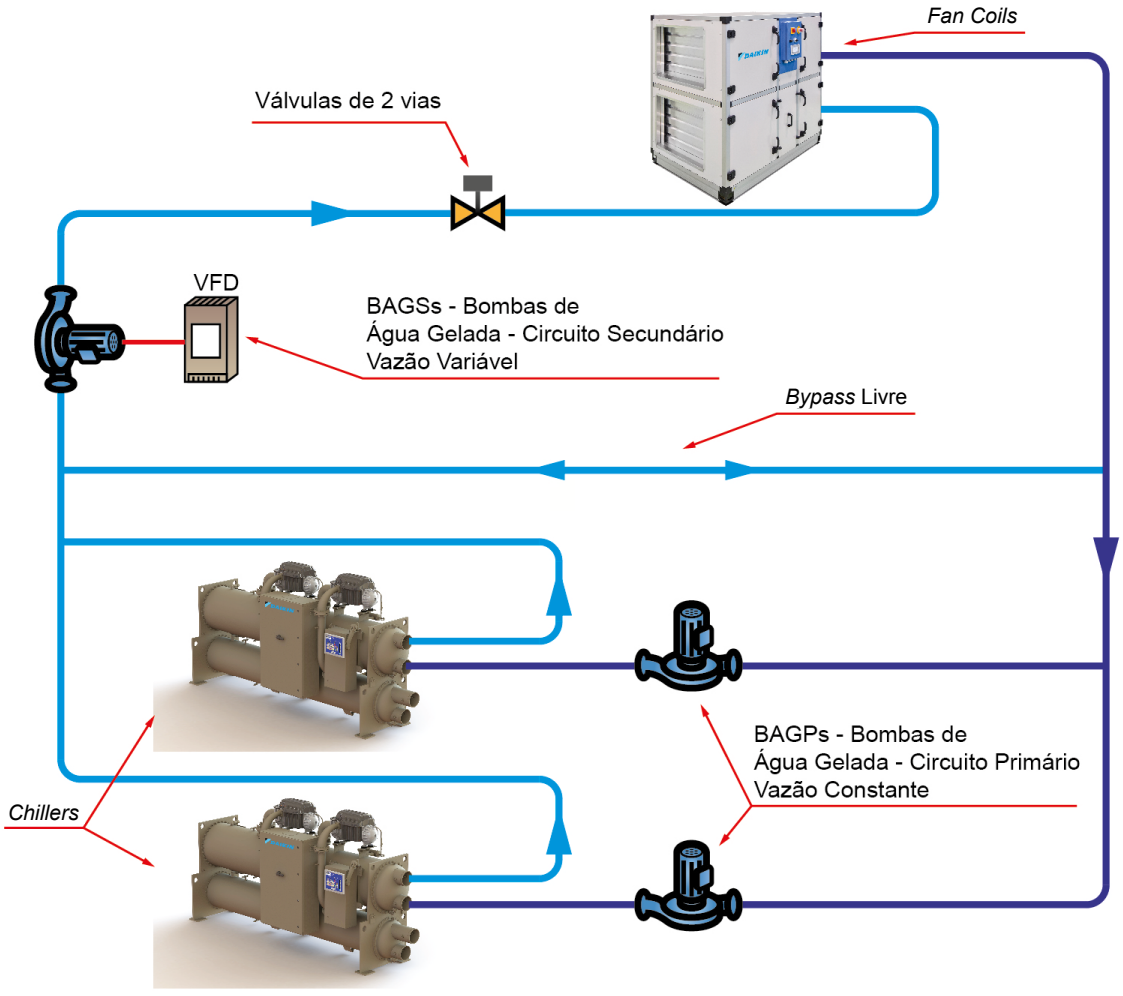
A Figura 8 mostra o fluxograma simplificado de um sistema de água gelada com dois *Chillers*, com circuito primário e secundário, com as BAGPs dedicadas aos *Chillers*.

O sistema analisado era ajustado para operar com dois *Chillers* até as 17h30min, quando iniciava o horário de ponta, com o custo da tarifa de consumo de energia elétrica mais caro. A partir desse horário, um dos *Chillers* era desligado e o sistema continuava em funcionamento dessa forma até o final da operação do sistema (após as 22h00min).

Porém, todos os dias quando um dos *Chillers* era desligado, o outro *Chiller* também parava por falha. Na sequência, após o reset da falha, o *Chiller* era novamente acionado e seguia operando "normalmente".

Entretanto, após a retomada da operação do *Chiller*, a temperatura de água gelada em todo sistema aumentava bastante. Acreditava-se que o pro-

Figura 8 – Fluxograma esquemático de um sistema com circuito primário e secundário de água gelada



Fonte: Elaboração do autor com fornecimento de imagens por Daikin do Brasil Ltda.

blema acontecia devido a várias causas, algumas até estapafúrdias, porque as bombas "não davam pressão" ou porque, com menor vazão (apenas um *Chiller*), o fluxo de água gelada se aquecia até a entrada dos condicionadores de ar.

Após monitoração das temperaturas de água gelada em alguns pontos do sistema, foi possível verificar os desvios, conforme apresentados no Gráfico 5.

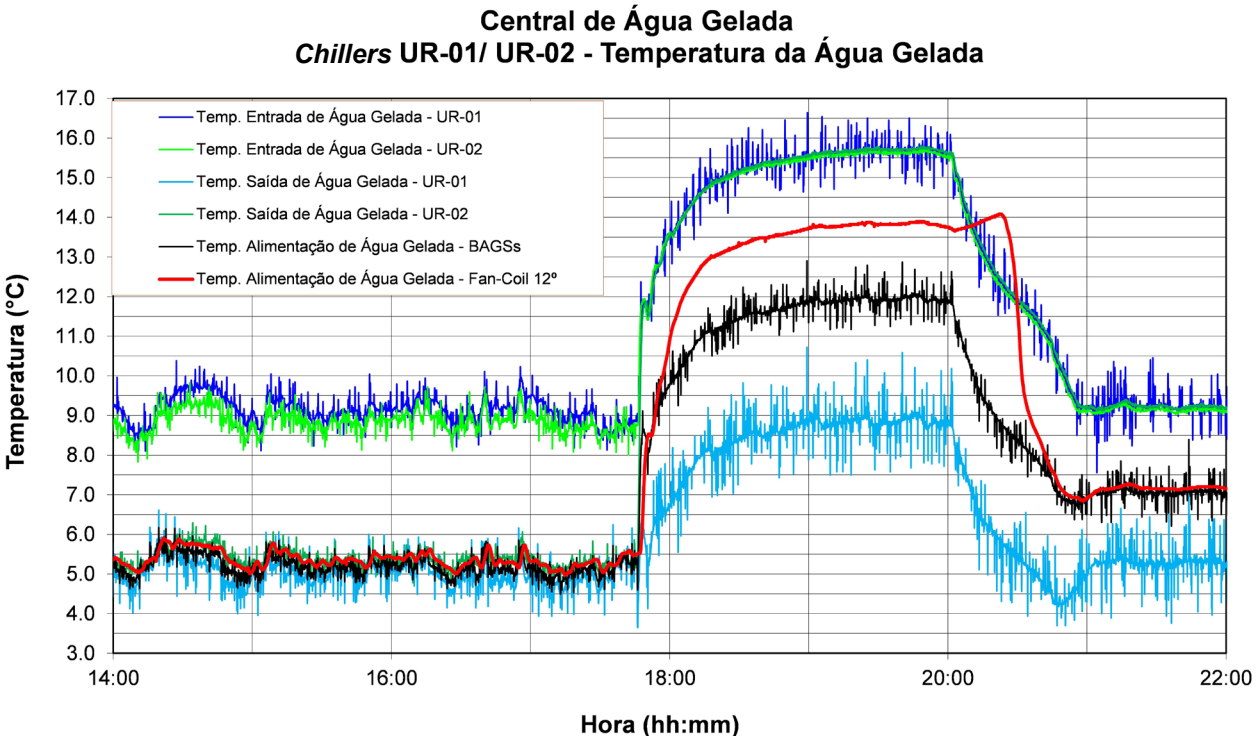
Até as 17h30min, com dois *Chillers* operando, verifica-se que a temperatura de saída de água gelada de cada *Chiller*, a temperatura de alimentação para as BAGSs e a temperatura de alimentação para o condicionador do 12º pavimento era a mesma, em torno de 5,5 ºC.

Após as 17h30min, com a parada de um dos *Chillers*, havia um aumento de temperatura de água gelada em todos os pontos do circuito, com a temperatura de saída de água gelada do *Chiller* UR-01 (em operação) atingindo 9,0 ºC.

Além disso, a vazão de água gelada no *Chiller* em funcionamento diminuía para cerca de 60% da vazão de projeto, como verificado no Gráfico 6. Verificou-se então que o problema acontecia com a parada do UR-02 quando, mesmo com a respectiva BAGP parada, continuava circulando água gelada (na temperatura de retorno) pelo seu evaporador, como se verifica no Gráfico 6.

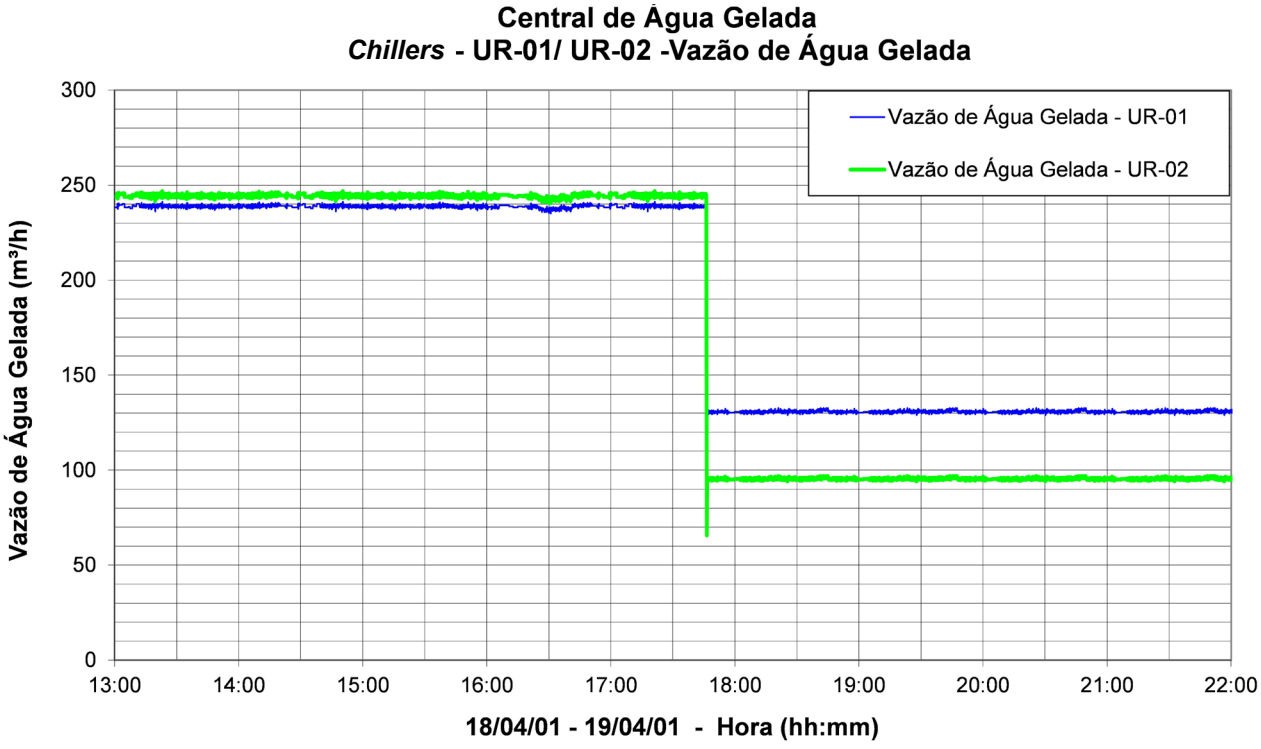
O Gráfico 7 mostra que o problema também ocorria no circuito de água de resfriamento.

Gráfico 5 – Perfil de temperaturas de água gelada no sistema



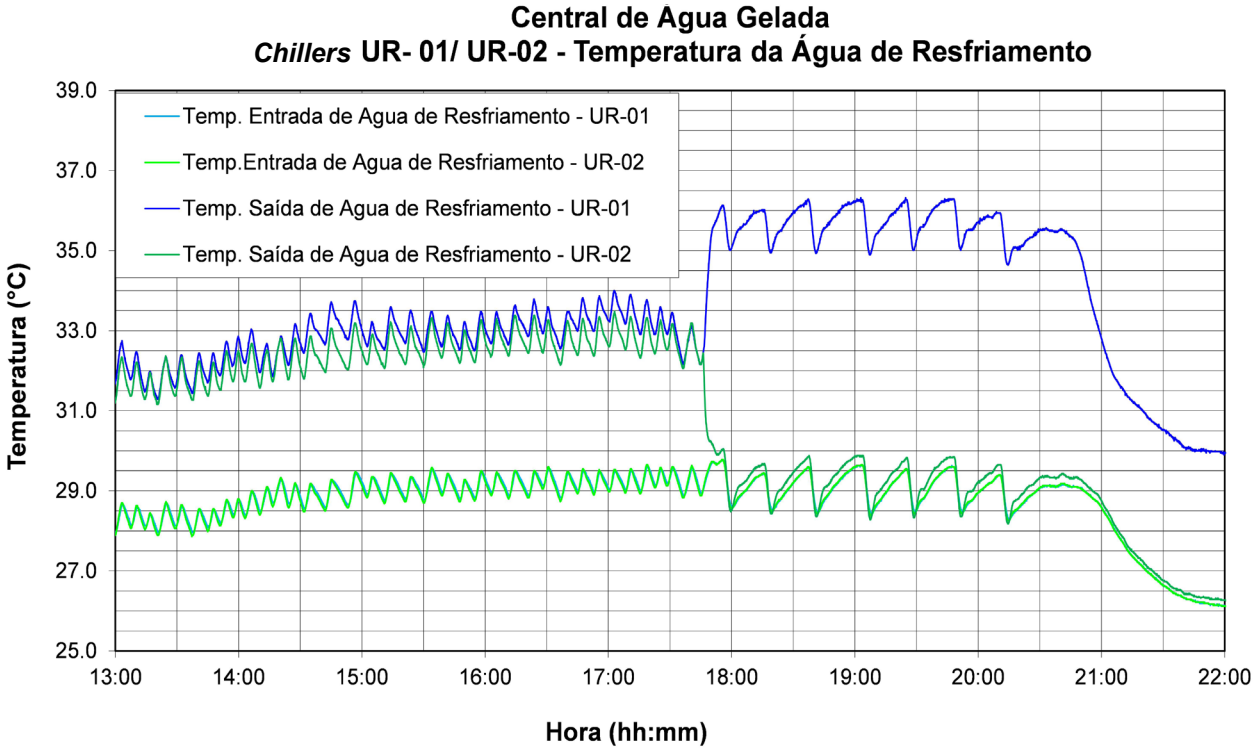
Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 6 – Perfil de vazão de água gelada nos *Chillers*



Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 7 – Perfil de temperaturas de água de resfriamento nos *Chillers*



Fonte: Elaboração do autor.

A causa do problema pode ser verificada na Figura 9, que mostra novamente o sistema de água gelada com as BAGPs dedicadas aos *Chillers* e inclui a BAGP reserva.

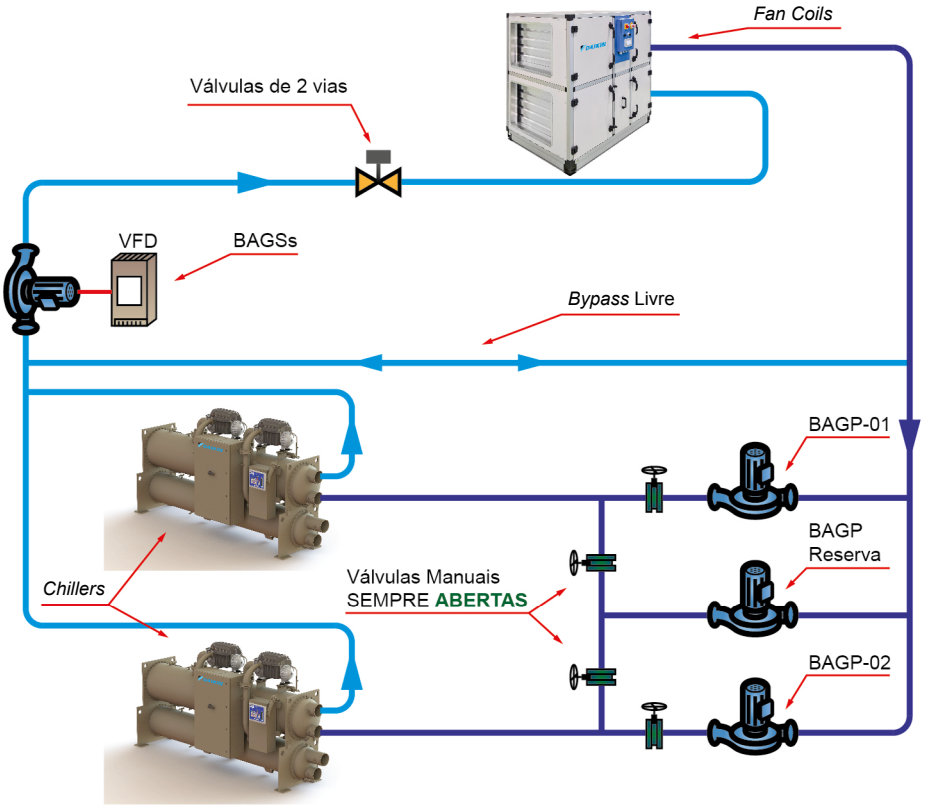
No fluxograma esquemático, foram destacadas as válvulas de bloqueio das BAGPs, que nesse caso eram válvulas manuais. No entanto, a lógica do sistema de automação foi concebida para que, em caso de falha de uma das BAGPs, a BAGP reserva deveria entrar automaticamente.

Portanto, durante os testes, verificou-se que seria necessário manter as válvulas de bloqueio manual abertas (em todo tempo) na linha de interligação entre o recalque da BAGP reserva e o recalque das BAGPs operantes, para que em caso de falha de uma das BAGPs operantes, a BAGP reserva pudesse operar sem entrar em "*shut-off*". Essa tomada de decisão foi realizada durante o "comissionamento" realizado pela empresa de automação, contratada em outro escopo, independente do instalador do sistema de água gelada.

Verificou-se então que, com a parada normal do UR-02 e da BAGP-02 e as válvulas de bloqueio da interligação do recalque da BAGP reserva abertas, com apenas a BAGP-01 em funcionamento, parte do fluxo da BAGP-01 segue para o UR-01, mas outra parte segue para o UR-2, passando pela tubulação de interligação do recalque das bombas.

A razão do problema não foi a utilização de válvulas de bloqueio manual. O sistema hidrônico foi concebido para que, em caso de falha de uma BAGP, o acionamento da BAGP reserva requeresse a atuação do operador, que deveria realizar algumas manobras no sistema, incluindo a abertura da válvula de bloqueio para o fluxo do *Chiller* que a BAGP reserva deveria atender. Só após isso, a BAGP reserva deveria ser selecionada (no painel elétrico) para substituir a BAGP em falha e ser habilitada no sistema de automação para funcionar em conjunto com o *Chiller*. Apesar de não usual em sistemas de ar condicionado em edifícios, essa é uma filosofia de controle de falhas de equipamentos muito utilizada na indústria e que tem coerência, pois, em caso de falha de equipamento, obriga o operador ir a campo para verificar e entender o que aconteceu, realizar as atividades de operação e manutenção necessárias e documentar que um equipamento está em falha.

Figura 9 – Sistema de água gelada com BAGPs dedicadas, com as válvulas de bloqueio manual da BAGP reserva mantidas sempre abertas



Fonte: Elaboração do autor com fornecimento de imagens por Daikin do Brasil Ltda.

Nesse caso, a Figura 10 mostra que as válvulas de bloqueio manual da interligação do recalque das BAGPs deveriam permanecer fechadas. O mesmo deveria acontecer com as BACs do circuito de água de resfriamento.

Outra opção, como mostra a Figura 11, seria a instalação de válvulas de bloqueio motorizadas na interligação de recalque, para acionamento em conjunto com a BAGP reserva para atender o determinado *Chiller*.

3.6.2 SISTEMA COM TERMOACUMULAÇÃO DE ÁGUA GELADA

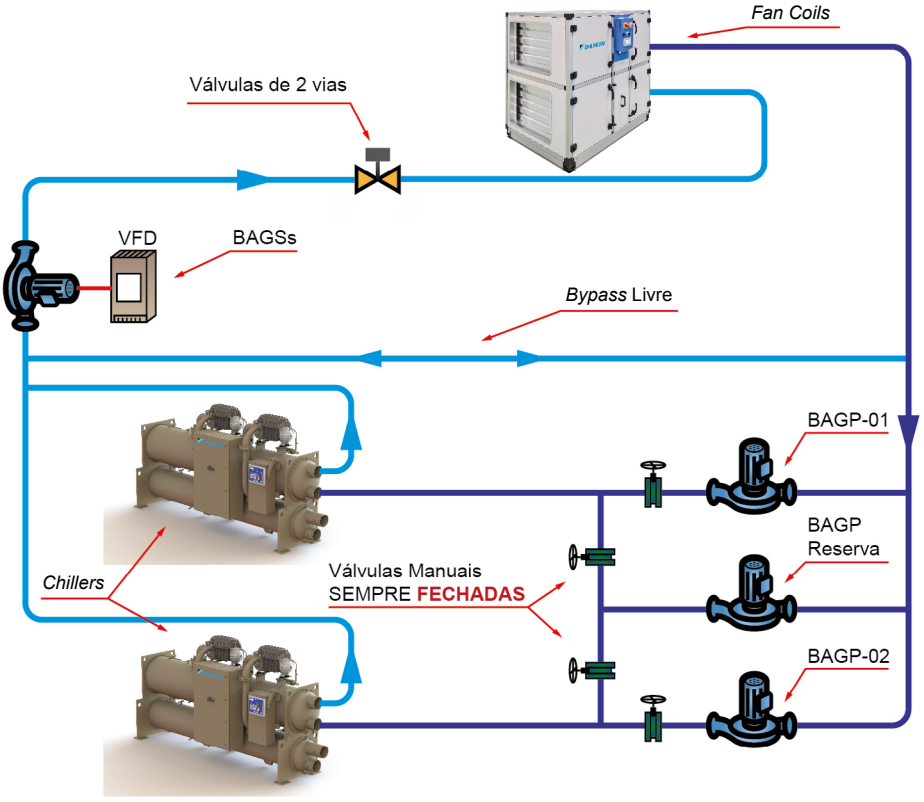
Os sistemas com termoacumulação de água gelada são os sistemas mais eficientes disponíveis. Podem ainda ser projetados para operar com DOAS e Vigas Frias e permite a associação de *Chillers* em série. Todas essas opções podem tornar ainda mais eficientes os sistemas com termoacumulação de água gelada.

No entanto, é necessário que a equipe de operação tenha pleno conhecimento de como manter esse sistema operando em suas condições ótimas e que as lógicas de controle do sistema de automação estejam adequadas, principalmente para o controle dos circuitos secundários de água gelada.

O sistema aqui analisado estava instalado em um *shopping center* e foi concebido para operar da seguinte forma:

- Das 09h30min às 17h30min – Horário de funcionamento normal do *shopping*, utilizando os *Chillers*, com o tanque de água gelada absorvendo as diferenças de fluxo entre o circuito primário e dois circuitos secundários (dois conjuntos de BAGSs);
- Das 17h30min às 20h30min (durante o horário da tarifa de ponta) – Horário de funcionamento nor-

Figura 10 – Sistema de água gelada com BAGPs dedicadas – Válvulas de bloqueio manual da BAGP reserva permanecem fechadas



Fonte: Elaboração do autor com fornecimento de imagens por Daikin do Brasil Ltda.

mal do shopping, utilizando apenas o tanque de água gelada, com as BAGSs dos dois circuitos em operação e os *Chillers* e as BAGPs desligados;

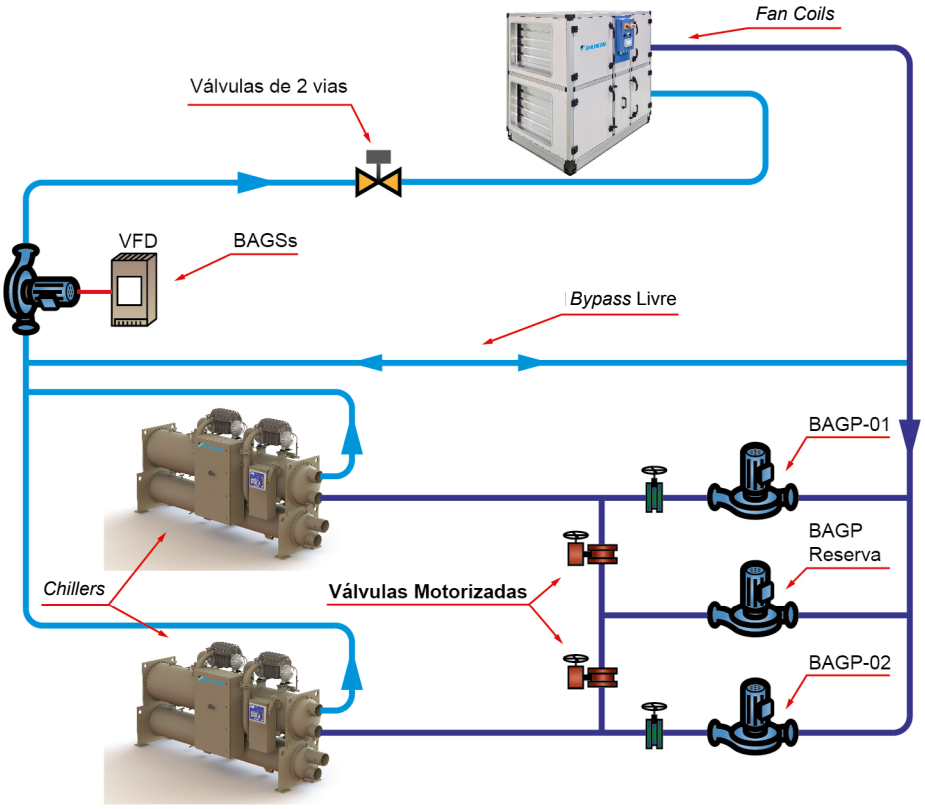
- Das 20h30min às 23h00min – Horário de funcionamento normal do *shopping*, utilizando os *Chillers*, com o tanque de água gelada absorvendo as diferenças de fluxo entre o circuito primário e dois circuitos secundários;
- Das 23h00min às 09h30min – *Shopping* fechado e BAGSs desligadas, com os *Chillers* operando em conjunto com as BAGPs para "carregamento" (resfriamento) do tanque de água gelada.

Após alguns anos de funcionamento, parte da área do *shopping* foi reformada para funcionamento de uma academia de esportes, que entrava em operação a partir das 07h00min, o que alterou a programação de funcionamento das BAGSs de um dos circuitos secundários do sistema.

Vale observar que em um sistema de termoacumulação de água gelada, diferente do sistema de termoacumulação de gelo, não há manobras operacionais para definir quando o tanque será "carregado" (resfriado) ou "descarregado" (aquecido com o fluxo da água de retorno dos condicionadores). Há dois horários distintos, quando os *Chillers* e BAGPs são desligados (quando acontece o descarregamento maior), e quando as BAGSs são desligadas (quando acontece o carregamento maior), porém, como o tanque de termoacumulação de água gelada está instalado no *bypass* entre o circuito primário e secundário, toda vez que a vazão do circuito primário for maior que a vazão total dos circuitos secundários, o excesso de vazão do circuito primário será para "carregar" parcialmente o tanque. Quando a vazão total dos circuitos secundários for maior que a vazão do circuito primário, o excesso de vazão será para "descarregar" o tanque.

Assim, com a nova programação de funcionamento de um dos conjuntos de BAGSs, no período das

Figura 11 – Sistema de água gelada com BAGPs dedicadas – Instalar válvulas de bloqueio motorizadas para manobra automática de operação da BAGP reserva



Fonte: Elaboração do autor com fornecimento de imagens por Daikin do Brasil Ltda.

07h00min às 09h30min, caso os *Chillers* ainda estivessem "carregando" o tanque (nos dias mais quentes do ano), eles continuariam operando normalmente, mas parte da vazão de água seria para atender os condicionadores de ar da academia. Esse era o conceito operacional do sistema conforme o projeto.

O sistema era constituído de dois *Chillers* com condensação a água, cada um com capacidade de 1.861 kW (529 ton) e com vazão de água gelada de 160 m³/h. O sistema era do tipo primário e secundário, com uma BAGP dedicada para cada *Chiller* e dois circuitos secundários, com BAGSs distintas. O tanque de termoacumulação de água gelada tinha um volume de 1.900 m³ e energia total de termoacumulação de 79.5 MJ.

Em seguida, a descrição do problema:

A análise foi realizada durante o período do inverno, no meio da semana, e com taxa de ocupação abaixo da média (baixa carga térmica), porém o *shopping* estava localizado em Minas Gerais, em uma cidade quente, mesmo nessa época do ano.

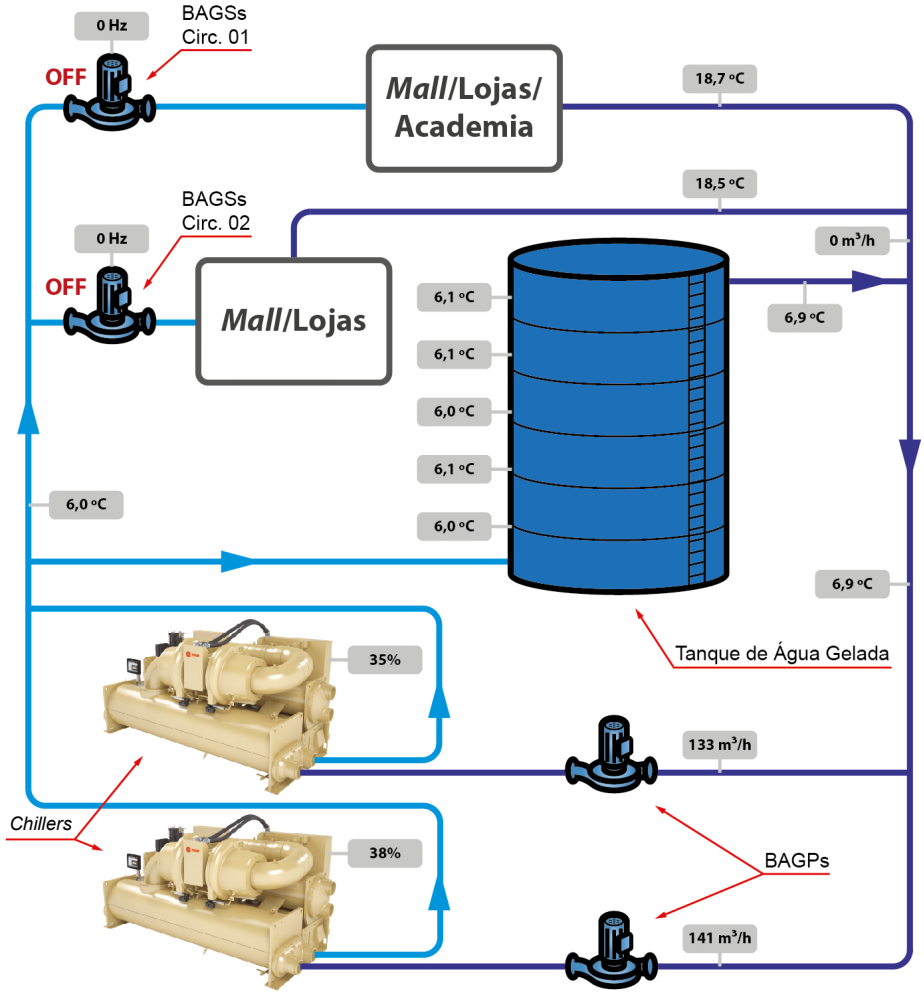
A Figura 12 indica que o tanque de água gelada estava totalmente carregado às 05h00min, ao final do processo de carregamento. Os *Chillers* operavam com aproximadamente 40% de carga. Durante o processo de carregamento, as BAGSs permaneceram desligadas.

Às 05h43min os *Chillers* foram desligados (baixa carga) e, a partir das 07:00, um *Chiller* voltou a operar, em conjunto com uma BAGP e para atender a carga térmica da academia, com uma BAGS em operação.

Às 09h30min os condicionadores de ar do shopping e lojas entraram em operação e o segundo *Chiller* (em conjunto com a respectiva BAGP) entrou em operação. Também foram acionadas as BAGSs dos dois circuitos secundários.

A Figura 13 indica a situação do sistema às 10h30min, quando foi possível observar que cerca de 33% do tanque já estava com água "quente", acima de 9,0 °C. Também verificou-se que os *Chillers* operavam com apenas 63% de carga.

Figura 12 – Condição 1 – 05h00min – Sistema com tanque de termoacumulação de água gelada "carregado"



Fonte: Elaboração do autor com fornecimento de imagens por Trane - Ingersoll Rand do Brasil Ltda.

Finalmente, como se verifica na Figura 14, às 17h30min, no horário de desligamento dos *Chillers* (por causa do horário da tarifa de ponta), o tanque estava praticamente "descarregado" com a temperatura da água acima de 11,0 °C em quase todos os anéis.

Logo após a parada em modo automático, os *Chillers* foram acionados em modo manual remoto, uma vez que o tanque não poderia atender a carga do shopping durante aquele período.

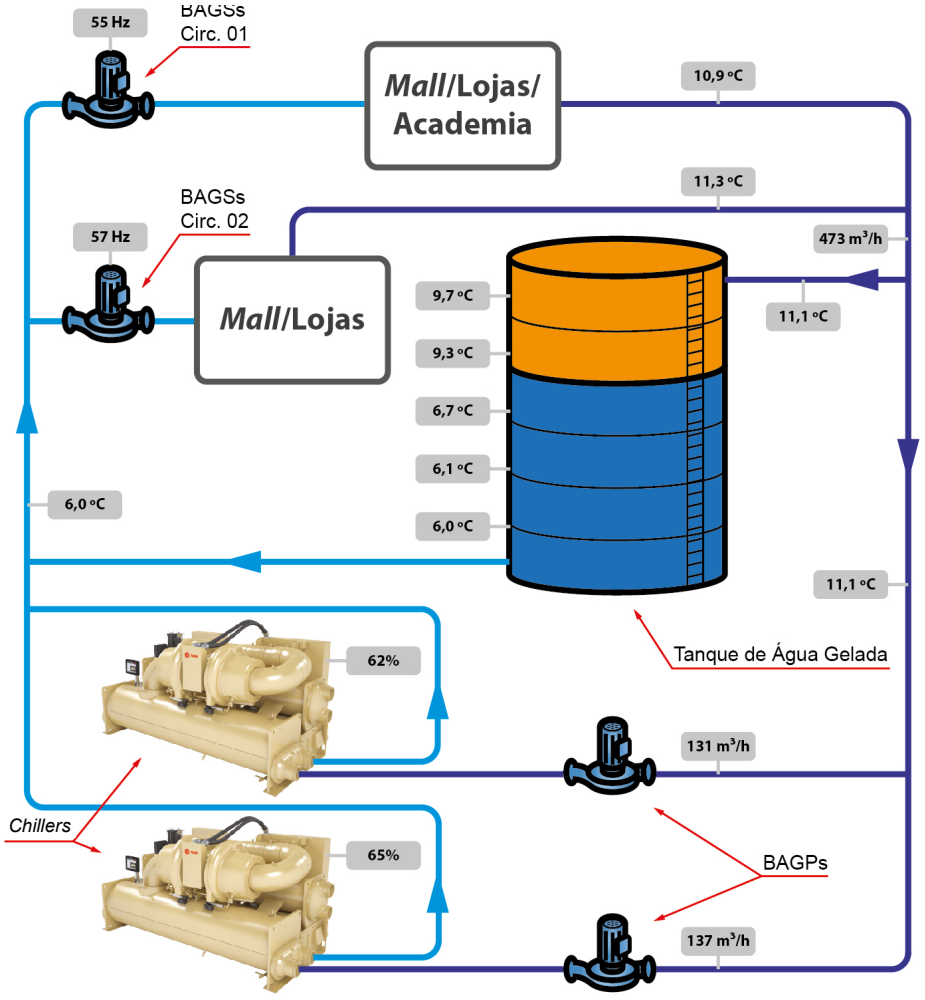
Ou seja, o tanque de termoacumulação que era "carregado" durante o período noturno, era "descarregado" ao longo do dia, em operação conjunta com os *Chillers*, de forma tal que no horário de ponta (quando apenas o tanque deveria atender toda carga térmica do *shopping*) ele já estava totalmente "descarregado".

As causas apontadas pela equipe de engenharia do cliente eram as seguintes:

- Com a instalação da academia, houve um aumento substancial da carga térmica do shopping e os *Chillers* não foram dimensionados para tanto;
- Além disso, os *Chillers* estavam com deficiência de capacidade/desempenho e já não conseguiam atender a carga a térmica total do sistema.

Portanto, a solicitação inicial do cliente era para verificar a nova carga térmica do sistema e qual a

Figura 13 – Condição 2 – 10h30min – Sistema com tanque de termoacumulação de água gelada "descarregando" fora do horário de ponta



Fonte: Elaboração do autor com fornecimento de imagens por Trane - Ingersoll Rand do Brasil Ltda.

capacidade complementar necessária para o dimensionamento de um novo *Chiller* a ser adquirido.

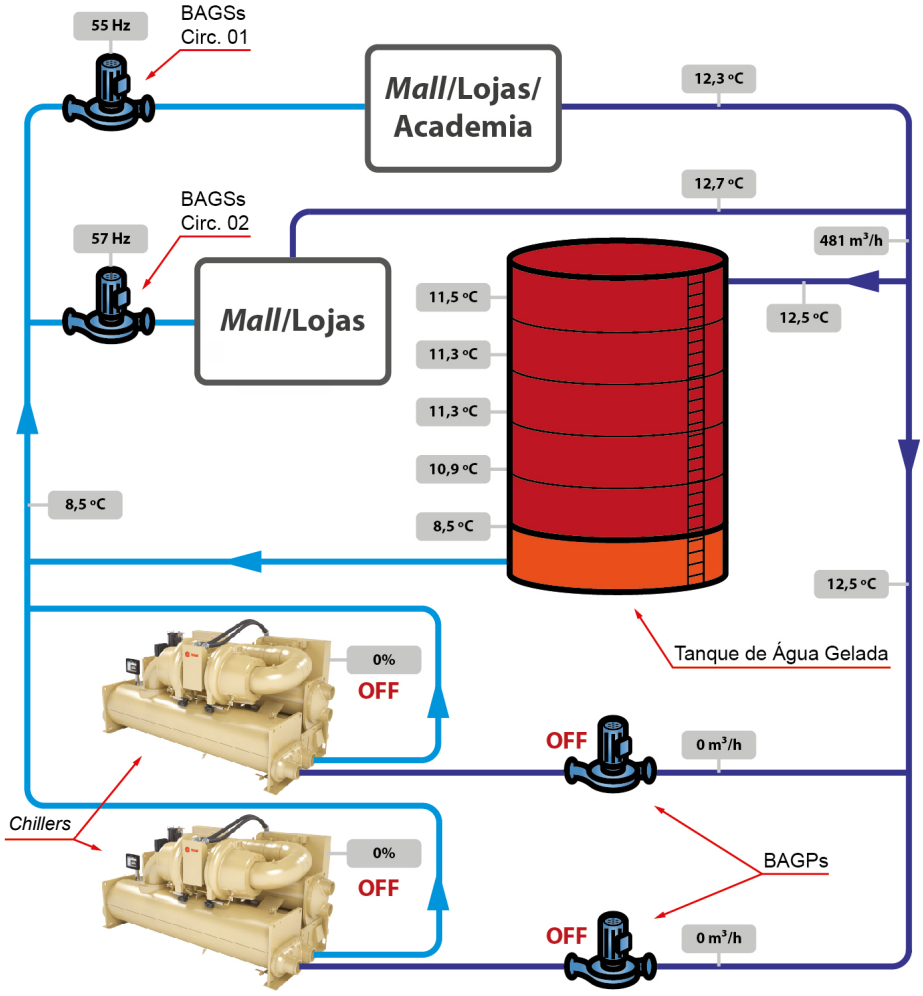
Algumas observações sobre as crenças do cliente:

- Verificou-se que a carga térmica total de projeto da academia era de apenas 211 kW (60 ton). Apesar das instalações utilizarem muitos fancoletes (com diferencial de temperatura de 5,5 °C), a vazão total de água gelada para os condicionadores da academia era de apenas 27 m³/h;
- Os *Chillers* operavam em carga parcial durante todo tempo. Portanto, independente de eventuais perdas de capacidade e eficiência dos *Chillers* (verificadas posteriormente), os *Chillers* não operavam com sua máxima capacidade atual.

Na sequência, foram realizadas monitorações de vazão e temperaturas nos *Chillers* e no sistema.

No Gráfico 8, com o perfil de vazão de água gelada no circuito primário e o total nos dois circuitos secundários do sistema, é possível observar que até as 09h30min, a vazão de água gelada total no circuito secundário era de aproximadamente 170 m³/h, com apenas os condicionadores de ar da academia em funcionamento (verificado em campo que todos os demais condicionadores de ar estavam desligados).

Figura 14 – Condição 3 – 17h30min – Sistema com tanque de termoacumulação de água gelada totalmente "descarregado" no início do horário de ponta



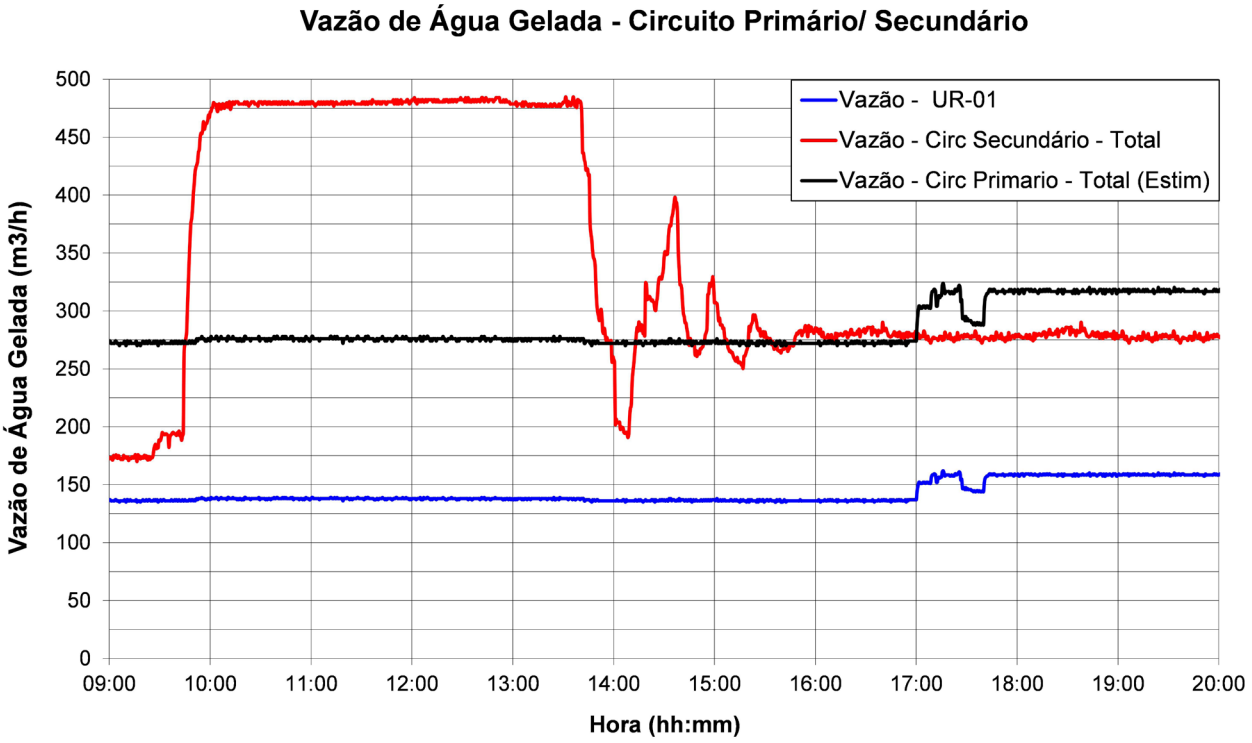
Fonte: Elaboração do autor com fornecimento de imagens por Trane - Ingersoll Rand do Brasil Ltda.

A partir das 09h43min, com o funcionamento normal do shopping center, todos os condicionadores de ar foram acionados e a vazão total no circuito secundário aumentou para aproximadamente 480 m³/h (a vazão máxima de projeto dos circuitos secundários era de 320 m³/h). As vazões de água gelada dos *Chillers* também estavam com um valor um pouco abaixo do projeto. Das 09h43min até as 13h41min a vazão total dos circuitos secundários estava muito acima da vazão total do circuito primário.

Essa diferença de vazão era suprida pelo tanque de termoacumulação, pois o excesso de vazão dos circuitos secundários no retorno que não seguia para as BAGPs (e *Chillers*), passava pelo *bypass* no sentido inverso, ou seja, passava pelo tanque, que recebia água quente, mas enviava água gelada. Portanto, durante esse período, parte da carga térmica era suprida pelos *Chillers* (57%) e parte da carga térmica era suprida pelo tanque (43%). Como consequência, o diferencial de temperatura de água gelada no circuito secundário era menor e por essa razão os *Chillers* operavam com carga parcial.

É importante observar que, diferentemente de um sistema com circuito primário e secundário simples, se a vazão no circuito secundário for superior à vazão do circuito primário, nesse caso, a temperatura de alimentação de água gelada para o circuito secundário não irá aumentar enquanto houver água gelada no tanque de termoacumulação.

Gráfico 8 – Perfil de vazão de água gelada no circuito primário e secundário



Fonte: Elaboração do autor.

Na sequência das atividades, a partir das 13h41min, os *setpoints* de controle de vazão de cada circuito secundário foram ajustados até que a partir das 16h00min, chegou-se a valores menores (empíricos) nos circuitos secundários, baseados no diferencial de temperatura de projeto (10 °C). A partir das 17h00min, os *Chillers* foram ajustados para operar na vazão de projeto (superior à vazão total dos circuitos secundários) e passaram a operar com carga superior a 90%. A pequena diferença de vazão mudou de sentido e o tanque voltou a ser "carregado".

Apesar de o ajuste de *setpoint* do controlador de vazão do circuito secundário ser uma tarefa "fácil" quando se dispõe de instrumentação para monitoração de vazão e temperaturas de água gelada no circuito secundário, a vazão excessiva é o resultado da síndrome de baixo ΔT no circuito secundário. Portanto, após os ajustes de *setpoint* de controle de vazão, foi verificado que vários condicionadores estavam com problemas de manutenção (filtros sujos, ventiladores deficientes, serpentinas entupidas, *setpoints* de controle de temperatura de ambiente ajustados para 17 °C, etc) e, como consequência, as válvulas de 2 vias de controle de vazão de água gelada nos condicionadores de ar operavam totalmente abertas, provocando a vazão excessiva. Para operar adequadamente, vários equipamentos precisaram ser revisados.

Além disso, as válvulas de 2 vias de controle de vazão de água gelada de muitos condicionadores de ar não fechavam quando ele era desligado (ficavam na posição atual). Por isso, no período de funcionamento exclusivo da academia, havia uma vazão de 170 m³/h, muito acima da vazão máxima de projeto (27 m³/h).

Outra observação importante é que a vazão total dos circuitos secundários estava muito acima da vazão de projeto. Isto ocorria porque as BAGSs foram dimensionadas para uma altura manométrica elevada (45 m.c.a.), muito acima dos valores verificados em campo quando os circuitos operavam nas vazões de projeto (23 m.c.a. no circuito 01 e 27 m.c.a. no circuito 02). Inicialmente as BAGSs foram ajustadas para operar com frequência menor e posteriormente elas foram substituídas por bombas menores.

Foram ainda realizados os testes de desempenho dos *Chillers* quando se verificou que, em condi-

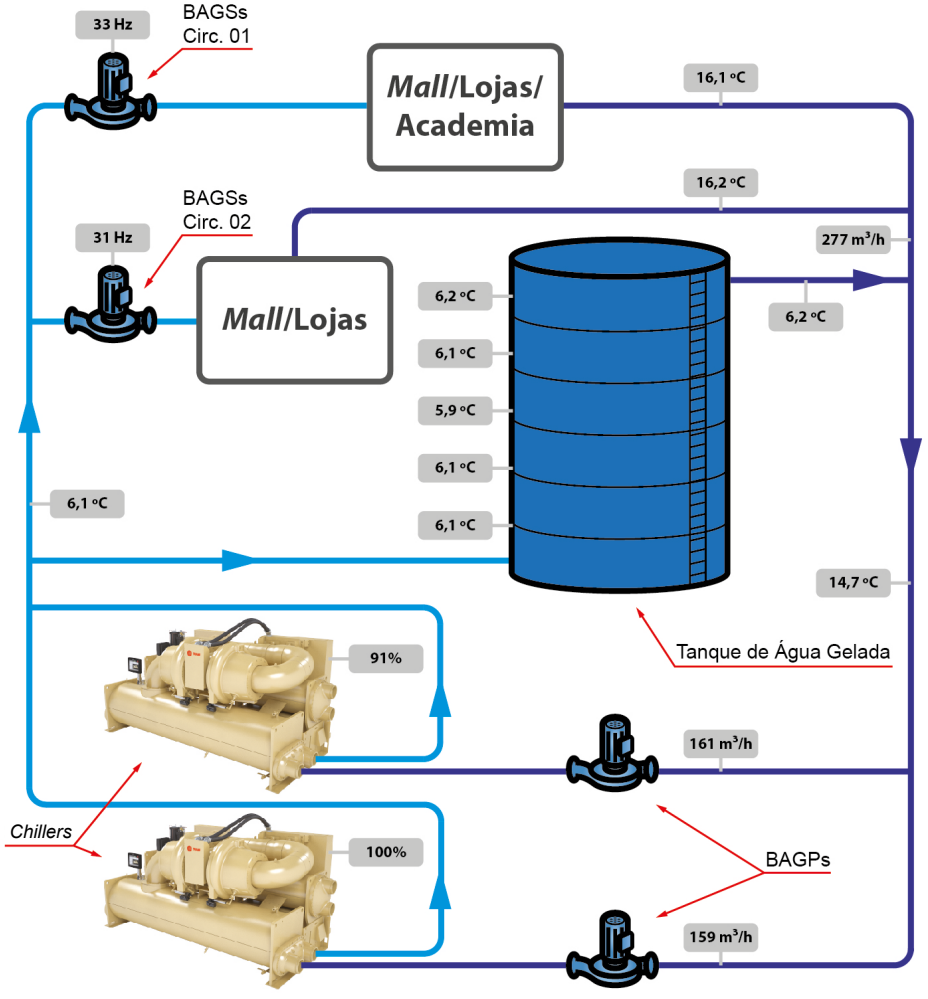
ções muito próximas às de projeto, um deles estavam com capacidade máxima de aproximadamente 1.630 kW e com COP cerca de 15% abaixo. O outro operava capacidade de 1.770 kW e com COP cerca de 7% abaixo. Os problemas encontrados se referiam à baixa carga de fluido refrigerante e sujeira em excesso nos condensadores.

Após vários ajustes, o sistema passou a operar conforme o conceito do sistema de termoacumulação de água gelada e, no final da tarde, o tanque estava totalmente carregado e pronto para atender os circuitos secundários no horário de ponta, conforme indicado na Figura 15.

A partir dessa análise, pode-se concluir que o efeito da síndrome de baixo ΔT em um sistema de termoacumulação de água gelada é um grave problema, pois com o excesso de vazão nas BAGSs haverá um "descarregamento" natural de água gelada do tanque, enquanto os *Chillers* trabalham com carga reduzida. Esse é um problema muito grave para o funcionamento do sistema, pois o volume total de água gelada do tanque pode ser consumido antes do final ou até mesmo antes do início do horário de ponta.

Portanto, é essencial que haja um sistema de automação bem configurado para que possa gerenciar e tomar decisões para evitar tais desvios, além de um programa de manutenção adequado dos condicionadores de ar para mantê-los operando em condições adequadas ao sistema, sem prejuízo para

Figura 15 – Condição 4 – 17h30min – Sistema com tanque de termoacumulação de água gelada totalmente "carregado" no início do horário de ponta



Fonte: Elaboração do autor com fornecimento de imagens por Trane - Ingersoll Rand do Brasil Ltda.

as condições dos ambientes climatizados e sem prejuízos para a termoacumulação.

A seguir, algumas recomendações sobre como manter um sistema com tanque de termoacumulação de água gelada operando em condições ótimas:

- O diferencial de temperatura de água gelada de projeto no tanque de água gelada deve ser igual ao dos *Chillers* e dos *Fan Coils* – deve-se tomar muito cuidado no dimensionamento das serpentinas;
- Para o controle de vazão do circuito secundário (sobre os inversores de frequência das BAGSs), recomenda-se utilizar a temperatura geral de retorno do circuito secundário como elemento de controle alternativo;
- Evitar a operação dos *Chillers* em carga parcial e otimizar operação durante períodos mais amenos, entre carga e descarga do tanque.

3.6.3 *CHILLERS* COM VÁRIOS CIRCUITOS DE REFRIGERAÇÃO

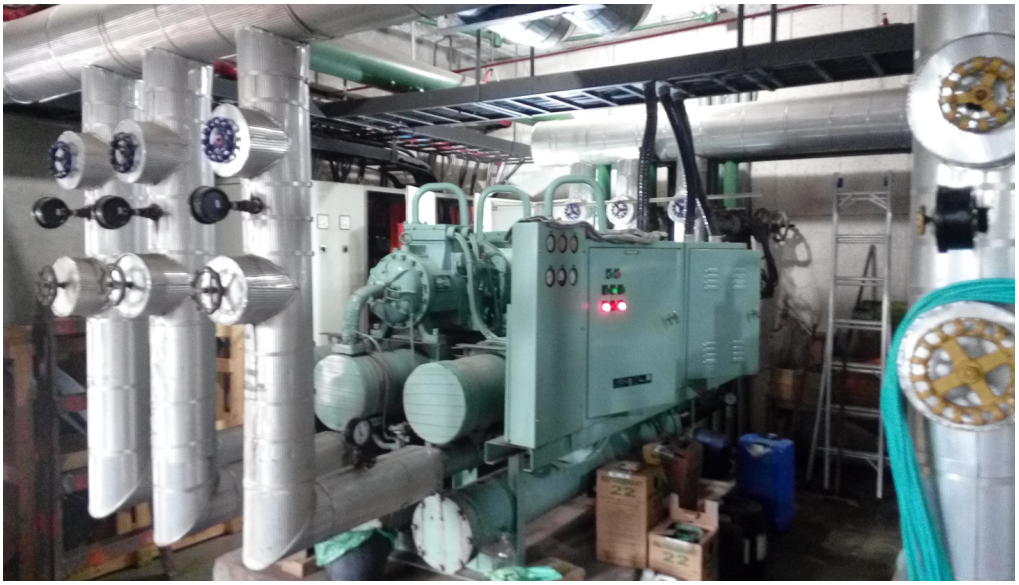
A maioria dos *Chillers* com vários circuitos de refrigeração são, de fato, vários *Chillers* operando em paralelo, montados em um único *Skid*, porém com um painel de controle único e centralizado. O conceito da aplicação desse tipo de *Chiller* é basicamente para reduzir o custo inicial de investimento.

No entanto, esse tipo de *Chiller* montado em uma Central de Água Gelada possui uma característica que resulta em um problema operacional grave para a operação do sistema de água gelada e para o próprio desempenho do *Chiller*.

A Figura 16 apresenta a foto de um *Chiller* com três circuitos de refrigeração no qual é possível notar três tubulações de alimentação de água gelada, uma para cada evaporador/circuito de refrigeração. No entanto, esse *Chiller* é alimentado por apenas uma bomba de água gelada, projetada para operar com vazão constante (bombas do circuito primário) igual à vazão de projeto do *Chiller* – vazão total dos três circuitos.

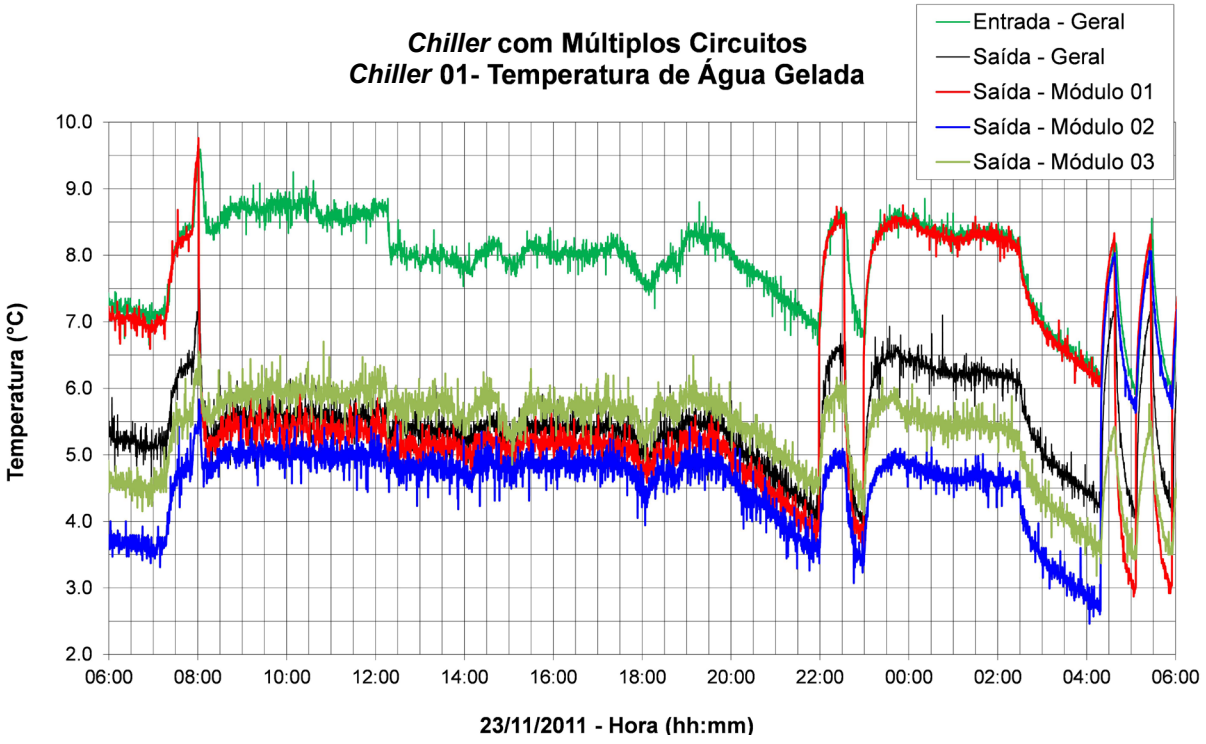
O controle de capacidade para cargas parciais se dá por desligamento de circuitos, com a parada do respectivo compressor. No entanto, é possível observar que no circuito de água gelada não há uma válvula motorizada para o bloqueio de fluxo quando o circuito de refrigeração não está em operação, portanto, com a parada de um circuito de refrigeração (mesmo que seja por falha), a água gelada continua circulando pelo evaporador sem carga, o que significa que a temperatura da água gelada na saída desse circuito é a mesma temperatura de entrada, ou seja, a temperatura de água de retorno dos condicionadores de ar.

Figura 16 – Exemplo de *Chiller* com vários circuitos de refrigeração em paralelo



Fonte: Somar Engenharia Ltda.

Gráfico 9 – Perfil de temperaturas de água gelada em *Chiller* com vários circuitos de refrigeração em paralelo



Fonte: Elaboração do autor.

Assim, na saída geral do *Chiller*, o fluxo de água quente de retorno, que não foi resfriado no circuito parado, se mistura com o fluxo dos demais circuitos em funcionamento, o que resulta em uma temperatura acima do valor do *setpoint* de temperatura de saída de água gelada do *Chiller*.

Alguns *Chillers* possuem ainda um sensor de temperatura instalado na tubulação geral de saída do *Chiller*, como o elemento de controle de capacidade do *Chiller*. Nesse caso, para atender o setpoint na saída geral, por causa do fluxo com água quente, os demais circuitos operam com temperaturas de saída de água gelada abaixo do *setpoint* para compensar.

O Gráfico 9 mostra o perfil de temperaturas de água gelada de um *Chiller* com três circuitos (módulos) de refrigeração. Foram instalados sensores de temperatura nas tubulações de entrada e saída geral de água gelada do *Chiller* e na saída de água gelada de cada evaporador.

Inicialmente, é possível verificar que havia uma diferença de cerca de 1,0 ºC entre a temperatura de saída do módulo 3 e do módulo 2. Com a parada do módulo 1, a temperatura de saída geral de água gelada do *Chiller* subiu de 5,5 ºC para cerca de 6,3 ºC, enquanto a temperatura de saída do módulo 2 diminuiu para 4,6 ºC.

Para esse tipo de *Chiller*, a solução não seria instalar válvulas de bloqueio motorizadas nas tubulações de água gelada de cada circuito, pois, tipicamente, em um sistema com circuito primário e secundário, as BAGPs (bombas primárias) operam com vazão constante. Portanto, com o fechamento de uma válvula, a vazão total da BAGP irá diminuir, mas a vazão nos demais circuitos irá aumentar. Nem seria o caso de incluir inversores de frequência nas BAGPs e desenvolver uma lógica com variação discreta de vazão em função do desligamento dos estágios, pois tudo isso iria onerar o sistema, ou seja, contra o conceito inicial da aplicação desse tipo de *Chiller* – baixo custo de investimento.

Além disso, estima-se que em cargas parciais o consumo de energia desse tipo de *Chiller* seja cerca de 15% a 20% menor que *Chillers* com circuito único ou com *Chillers* com vários circuitos, mas que utilizam apenas 1 evaporador.

Portanto, esse tipo de *Chiller* não é recomendável para nenhuma aplicação.



4 PROCESSO DE RETROCOMISSIONAMENTO EM SISTEMAS DE ÁGUA GELADA RELATO DE CASO – PROJETO DEMONSTRATIVO[1]

O **Projeto Demonstrativo de Gerenciamento Integrado no Setor de *Chillers***, desenvolvido no âmbito das ações do Protocolo de Montreal no Brasil executou processos de retrocomissionamento em instalações de ar condicionado de quatro edifícios existentes com sistemas de água gelada utilizando *Chillers*, com o objetivo de identificar oportunidades de melhorias no sistema, para aumento da eficiência energética, redução de custos operacionais e produção de benefícios ambientais para proteção da camada de ozônio e do sistema climático.

Na execução do processo de retrocomissionamento do Sistema de Ar Condicionado do Edifício 01, foram realizadas as principais atividades de investigação e análise do sistema, com os resultados conforme apresentados a seguir.

4.1 ANÁLISE DO PROJETO EXECUTIVO

4.1.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ÁGUA GELADA

A central de água gelada do projeto inicial era constituída por um sistema com termoacumulação de gelo, utilizando dois *Chillers* (UR-01A/UR-01B) com compressores parafusos (cada um com capacidade de 1.408 kW – 400 ton), utilizando HCFC-22, com condensação a água, operando em sistemas com circuitos primário e secundário de água gelada (solução de água e etileno glicol a 25% em peso), com dois tanques de termoacumulação.

A carga térmica máxima de projeto do edifício era de 3.973 kW (1.130 ton). Nos períodos de picos de carga térmica durante o verão, era necessário o funcionamento dos dois *Chillers* em sua máxima capacidade (2.816 kW) e a "queima" de gelo parcial, como complemento de carga (máximo de 1.157 kW – 330 ton).

Os *Chillers* (URs) operavam com duplo *setpoint* de controle de água gelada. No período normal de operação, os *Chillers* atendiam o circuito secundário de água gelada do sistema de ar condicionado, com *setpoint* da temperatura de saída de água gelada dos *Chillers* em 5,5 °C. No período noturno, os *Chillers* atendiam os tanques de termoacumulação de gelo, durante o período de fabricação de gelo, com *setpoint* da temperatura de saída de água gelada dos *Chillers* em -6,1 °C.

Em 2012 foi executado um projeto de alteração do sistema e adotado um novo conceito de operação com circuito único com vazão variável, no qual apenas a bomba principal (do circuito secundário existente) opera para a circulação da água gelada nos condicionadores de ar com os *Chillers* operantes em série, no retorno da linha principal para o resfriamento da água gelada.

Assim, as BAGPs foram desativadas e desde então os *Chillers* operam com vazão variável, a mesma vazão total que atende os condicionadores de ar do sistema de ar condicionado.

O projeto de alteração incluiu ainda a instalação de mais um *Chiller* no sistema (UR-03), de maior capacidade (2.645 kW – 752 ton), de forma a atender a carga térmica máxima do edifício (3.973 kW – 1.130 ton), em operação paralela com um dos *Chillers* de menor capacidade (UR-01A ou UR-01B), sem a necessidade de "queima" de gelo nos horários de pico de carga térmica. O outro *Chiller* passou a operar como reserva.

Devido ao ótimo desempenho da operação do novo sistema, a rotina operacional mudou e o processo de termoacumulação de gelo foi desativado. Com isso, os tanques de termoacumulação de gelo foram isolados do restante do sistema e a solução de etileno glicol foi substituída por água gelada apenas.

O calor rejeitado dos *Chillers* é retirado através de um circuito de água de resfriamento, com bombas de água de resfriamento (BACs) dedicadas aos *Chillers* (além de uma bomba reserva) e enviado a

[1] Elaborado por Leonilton Tomaz Cleto e Maurício Salomão Rodrigues – Somar Engenharia Ltda.

três torres de resfriamento (TRs). No novo sistema, as três torres podem operar simultaneamente. Com apenas o UR-03 operam duas torres. Cada *Chiller* de menor capacidade opera com apenas uma torre.

No sistema atual, as bombas do circuito secundário, que foram renomeadas para bombas principais – BAGMs – suprem o circuito de distribuição de água gelada para as serpentinas dos *Fan Coils*, instalados nos pavimentos do edifício e os *Chillers*. As bombas principais operam com frequência variável, sendo uma operante e outra reserva.

O edifício possui 27 pavimentos, com um *Fan Coil* por pavimento nos pavimentos típicos (1º a 24º) e *Fan Coils* menores nos pavimentos térreo, mezanino e nos pavimentos 25º a 27º. Os *Fan Coils* possuem válvulas de controle de vazão de água gelada do tipo 2 vias, que são controladas pela temperatura de insuflamento do ar, na saída de cada *Fan Coil*.

Em julho de 2012, foi realizado um diagnóstico de desempenho do sistema, quando se verificou que o COP da CAG era de 2,82 kW/kW. A partir das modificações do sistema, em 2013, com os dados obtidos do novo diagnóstico de desempenho realizado, verificou-se que houve um aumento de eficiência energética da ordem de 50%, com o COP da CAG atingindo 4,23 kW/kW, mesmo com um *Chiller* antigo em operação.

4.1.2 FUNCIONALIDADE DO SISTEMA

Com a execução do projeto de modificação, o sistema de água gelada foi readequado e otimizado para as novas condições de operação do sistema, incluindo novos elementos de controle e monitoração da eficiência do sistema. Foram aplicadas as seguintes melhorias no sistema:

- Aumento da capacidade total dos *Chillers*;
- Implementação de *Chiller* reserva no sistema;
- Válvulas de balanceamento nos *Chillers*;
- Circuito único com vazão de água gelada variável;
- Inversores de frequência nos ventiladores das torres de resfriamento e controle da temperatura de água de resfriamento na saída das torres;
- Inversores de frequência nas BACs;
- Monitoração da capacidade e da eficiência energética (COP) dos *Chillers* e do sistema de água gelada.

As Figuras 17 à 20, apresentam algumas fotos do sistema de água gelada:

Figura 17 – Central de Água Gelada – *Chillers*



Fonte: Yawatz Engenharia Ltda.

Figura 18 – Central de Água Gelada – BAGMs/ BAGXs



Fonte: Yawatz Engenharia Ltda.

Figura 19 – Central de Água Gelada – BACs



Fonte: Yawatz Engenharia Ltda.

Figura 20 – Torres de Resfriamento



Fonte: Yawatz Engenharia Ltda.

4.1.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ÁGUA GELADA

O sistema atual foi dimensionado de maneira adequada para atender a carga térmica máxima de projeto do edifício, porém, conforme análise de desempenho real realizada em 2012, verificou-se que os *Chillers* com HCFC-22 (UR-01A e UR-01B) apresentavam capacidade efetiva de apenas 1.180 kW (335 ton). Apesar de a deficiência verificada nos testes, esses *Chillers* atendiam a carga térmica de pico de verão do edifício, pois o índice de ocupação era inferior a 80%.

Os demais equipamentos estavam dimensionados de acordo com os requisitos do projeto e com controle adequado para manter a estabilidade operacional do sistema.

4.1.4 CIRCUITOS HIDRÔNICOS

O circuito de água gelada foi alterado e as vazões de projeto nos *Chillers* readequadas para as novas condições do sistema. Foram instaladas válvulas de balanceamento nos *Chillers*, para garantir a distribuição de vazão adequada. Porém, o circuito hidrônico de distribuição de água gelada para os *Fan Coils* não possuía válvulas de balanceamento.

4.1.5 CIRCUITOS DE DISTRIBUIÇÃO DE AR

O conceito utilizado no projeto, que considerava vazão de ar constante no centro do pavimento e vazão variável nas periferias, não era adequado, pois, quando a vazão nas caixas de VAV (volume de ar variável) diminuía, havia um aumento parcial de fluxo de ar nas caixas de VAC (volume de ar constante), que não possuíam controle.

Nos projetos avaliados, não havia referências quanto à existência de colarinhos para ajuste da vazão de ar dos difusores de insuflamento. Para um efetivo balanceamento, seria necessário que houvesse dispositivos apropriados para ajustar a vazão ponto a ponto.

Não ocorreram reformas no sistema de distribuição de ar nos ambientes, porém os ambientes sofreram mudanças de *layout*. Houve mudanças quanto ao posicionamento das estações de trabalho em quase todos os pavimentos, inclusive com a criação de salas reservadas a reuniões, estúdios e outros tipos de ocupações, o que mudou a característica original de um ambiente único (*open space*) dos pavimentos.

A não adequação do sistema de distribuição de ar condicionado após mudanças de layout em um ambiente climatizado pode gerar desconforto ao usuário, visto que o controle de temperatura do ambiente fica comprometido.

Dos pavimentos selecionados para essa análise, foram observados os seguintes desvios:

- **2º, 18º e 20º Pavimentos –** os usuários poderiam sofrer desconforto nas salas de reunião, visto que a ocupação não era constante e não havia caixas de VAV para cada uma destas salas;
- **20º Pavimento –** os usuários poderiam sofrer desconforto nas salas de diretoria, pois a densidade de pessoas era muito diferente dos ambientes adjacentes.

4.1.6 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE AR

AR EXTERNO

Considerando a área útil de cada pavimento e a ocupação média por pavimento, a recomendação da ***ABNT NBR 16401:2008 – parte III*** exige uma vazão mínima de ar exterior em três níveis. A Tabela 15 mostra

Tabela 15 – Valores atuais de projeto por pavimento ocupado e a vazão mínima requerida pela ***ABNT NBR 16401:2008*** para os níveis 1 e 2

Pavimento	Nº de pessoas	Área	Vazão de Ar Externo				
			Projeto	NBR 16401 Nível 1	Desvio	NBR 16401 Nível 02	Desvio
		(m²)	(m³/h)	(m³/h)	(%)	(m³/h)	(%)
1º	170	1.235	3.398	2.864	18,7	3.676	-7,6
2º	180	1.235	3.398	2.954	15,0	3.787	-10,3
3º	180	1.235	3.398	2.954	15,0	3.787	-10,3
12º	205	1.235	3.398	3.179	6,9	4.066	-16,4
16º	160	1.252	3.568	2.792	27,8	3.588	-0,6
17º	220	1.252	3.568	3.332	7,1	4.258	-16,2
18º	210	1.252	3.568	3.242	10,1	4.146	-14,0
19º	180	1.270	3.568	2.992	19,3	3.838	-7,0
20º	200	1.067	2.888	2.952	-2,2	3.768	-23,4
21º	210	1.067	2.888	3.042	-5,1	3.880	-25,6
22º	120	1.067	2.888	2.232	29,4	2.876	0,4
23º	80	576	1.546	1.342	15,2	1.722	-10,2
24º	40	554	1.699	958	77,3	1.244	36,6
25º	15	322	799	483	65,5	631	26,6
26º	20	365	866	574	50,8	749	15,7
Total Atual	**2.190**	**14.984**	**41.438**	**35.893**	**15,4**	**46.017**	**-10,0**

Fonte: Elaboração do autor.

uma comparação entre os valores atuais de projeto por pavimento ocupado e a vazão mínima requerida pela ***ABNT NBR 16401:2008*** para os níveis 1 e 2.

A vazão de ar externo de projeto por pavimento estava acima da vazão mínima requerida pela ***ABNT NBR 16401:2008*** para atender o nível 1, em todos os pavimentos ocupados, exceto nos pavimentos 20 e 21, que apresentaram desvios pequenos (2% e 5%) e que podem ser ajustados com balanceamento. Verificou-se ainda que vários pavimentos estavam com vazão de ar externo bem acima do valor requerido para os níveis 01 e 02.

Para atender o nível 2, a maioria dos pavimentos apresentava vazão deficiente, com valor médio de 10% abaixo. Porém, a vazão total de ar externo necessária para atender o nível 2, com a ocupação atual (46.017 m³/h) era razoavelmente menor que a vazão do ventilador VC-14 (81.875 m³/h), que supre o ar externo para os pavimentos.

Com o balanceamento de vazão do ar externo para atender apenas os pavimentos ocupados (mantendo os *dampers* dos demais pavimentos fechados), seria possível atender o nível 2 da ***ABNT NBR 16401:2008*** e ainda reduzir a vazão de ar no VC-14 (com ajuste no inversor de frequência), com redução do consumo de energia no motor da ordem de 70%.

BALANÇO DE AR DO EDIFÍCIO

Considerando o edifício totalmente ocupado, a vazão total de projeto de ar externo comparada com a vazão total dos sistemas de exaustão foi a seguinte:

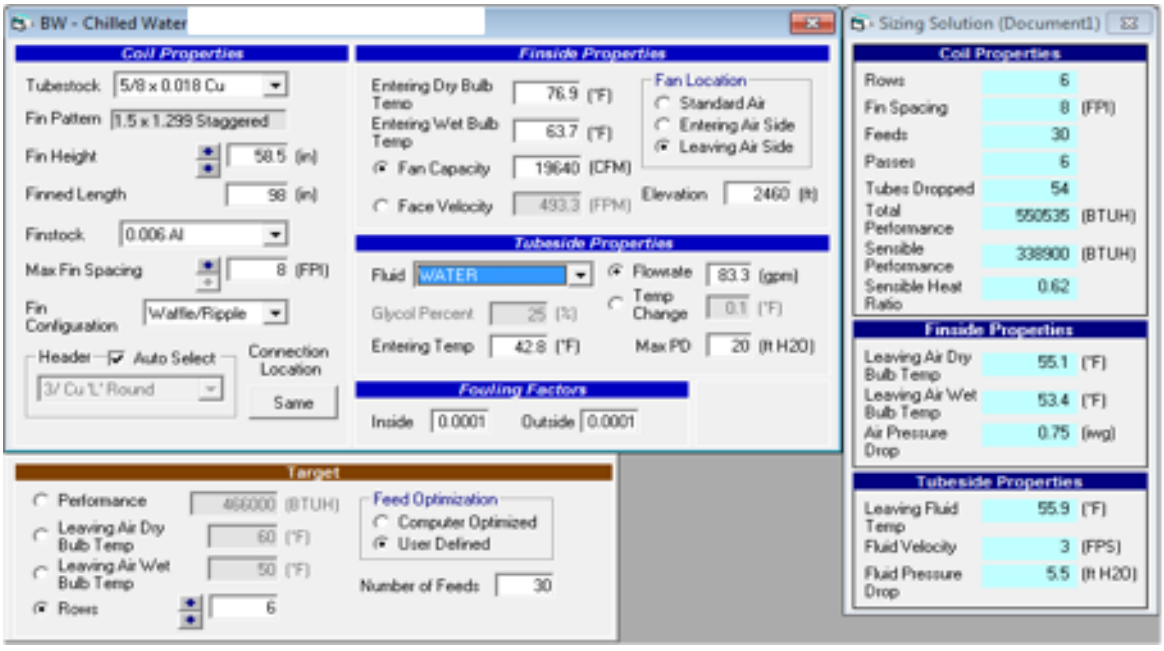
- Vazão de Ar Externo: 84.168 m³/h
- Vazão de Exaustão: 32.927 m³/h

Portanto, concluiu-se que o edifício se encontrava pressurizado em relação à atmosfera.

VERIFICAÇÃO DA OPERAÇÃO COM ÁGUA GELADA NAS SERPENTINAS

A Figura 21 mostra o resultado dos cálculos na tela de um *software* de simulação de desempenho de serpentinas de *Fan Coils*, indicando que com substituição da solução de etileno glicol para água gelada no circuito hidrônico, com temperatura de entrada de água gelada de 6,0 °C (42.8 °F) houve um aumento de 13% na capacidade máxima dos *Fan Coils* típicos, quando operando nas condições de projeto – de 142 kW para 161 kW (550.535 BTU/h).

Figura 21 – Resultados da simulação do cálculo da serpentina de um *Fan Coil* típico, utilizando água gelada a 6,0 °C



Fonte: CoilPro IV – Colmac Coil Manufacturing Inc, 2003.

4.1.7 DOCUMENTOS DE PROJETO

Na análise dos documentos de projeto do sistema de ar condicionado, verificou-se que os seguintes documentos estavam desatualizados:

- Desenhos *As Built* da CAG e área das torres de resfriamento;
- Desenhos *As Built* das redes de dutos dos pavimentos (com eventuais alterações) e desenhos de *layout* dos pavimentos (que deveriam ser compatíveis com as redes de dutos);
- Manual do sistema e dos equipamentos do projeto de alteração;
- PMOC (Plano de Manutenção Operação e Controle).

4.2 VERIFICAÇÃO DA INSTALAÇÃO

Os equipamentos e as instalações de um modo geral estavam instalados conforme os requisitos de projeto e de acordo com os desenhos e especificações técnicas. Os problemas verificados foram típicos da falta de manutenção adequada nos equipamentos e se referiam aos aspectos mecânicos, elétricos e de automação dos componentes.

Os problemas verificados devem ser incluídos nas rotinas do PMOC com ações de correções efetivas. As Tabelas 16 e 17 apresentam um resumo dos desvios encontrados.

4.2.1 CENTRAL DE ÁGUA GELADA

Tabela 16 – Desvios encontrados na Verificação de Instalação – Central de Água Gelada

Equipamento	Desvio	Correção	Atividade
BAGM-01	Vibração excessiva	Revisão Geral	Manutenção de Mecânica
UR-01A	Atuador - Válvula Motorizada	Substituição	Manutenção Elétrica
UR-01B	Atuador - Válvula Motorizada	Substituição	Manutenção Elétrica
TR-01	Atuador - Válvula Motorizada	Substituição	Manutenção Elétrica
TR-02	Atuador - Válvula Motorizada	Substituição	Manutenção Elétrica
Filtros - Geral	Sujeira no circuito de água gelada	Rotina PMOC	Manutenção Mecânica
Medidor de Vazão FE-01	Leitura errada no sistema supervisório	Verificar Controladora	Manutenção de Automação
Purgadores de Ar	Não instalados	Instalar Purgadores	Instalação Mecânica

Fonte: Elaboração do autor.

4.2.2 CONDICIONADORES DE AR

Na avaliação geral das válvulas de 2 vias, considerando que elas já estão no final da vida útil, recomenda-se a substituição total por válvulas com controle otimizado do consumo de água gelada nos condicionadores de ar. O mesmo pode ser aplicado aos inversores de frequência dos ventiladores.

A Figura 22 mostra que a purga de ar do circuito hidrônico era manual e, por se tratar de solução de etileno glicol, era necessário drenar a solução extravasada para recipientes de recolhimento para evitar perdas.

Tabela 17 – Desvios encontrados na Verificação de Instalação – Condicionadores de Ar

Desvio	Equipamento	Correção	Atividade
Sujeira nos filtros de água gelada	Geral	Rotina PMOC	Manutenção Mecânica
Isolamento Térmico da Tubulação	Geral	Substituição	Instalação Mecânica
Válvula de 2 Vias/ Atuadores	16 *Fan Coils*	Revisão Geral/ Substituição	Manutenção Mecânica/ Elétrica/ Automação
Inversor de Frequência	13 *Fan Coils*	Revisão Geral/ Substituição	Manutenção Elétrica/ Automação

Fonte: Elaboração do autor.

Figura 22 – Sistema improvisado de purga de ar manual



Fonte: Yawatz Engenharia Ltda.

4.2.3 INSTALAÇÃO DE AR CONDICIONADO NOS PAVIMENTOS

Em todos os pavimentos, onde deveriam existir caixas de VAC estavam instaladas caixas de VAV com atuadores, porém sem controle de vazão. Esse dispositivo tem a capacidade de operar como uma VAV, porém nunca foram operados com essa função. Os atuadores operavam apenas com a função de abrir 100% ou fechar totalmente (*On/Off*), mediante comando manual remoto (forçado). Assim, quando a vazão de ar nas regiões perimetrais diminuía (devido ao controle nas VAVs), aumentava a vazão de ar nas regiões centrais dos pavimentos (nas VACs sem controle).

Na Figura 23, a área em amarelo era atendida por caixas de VAV, onde a temperatura ambiente era controlada pela variação da vazão do ar insuflado (com temperatura de insuflamento constante). A vazão total nessa área era equivalente a 65% da vazão de ar total do pavimento.

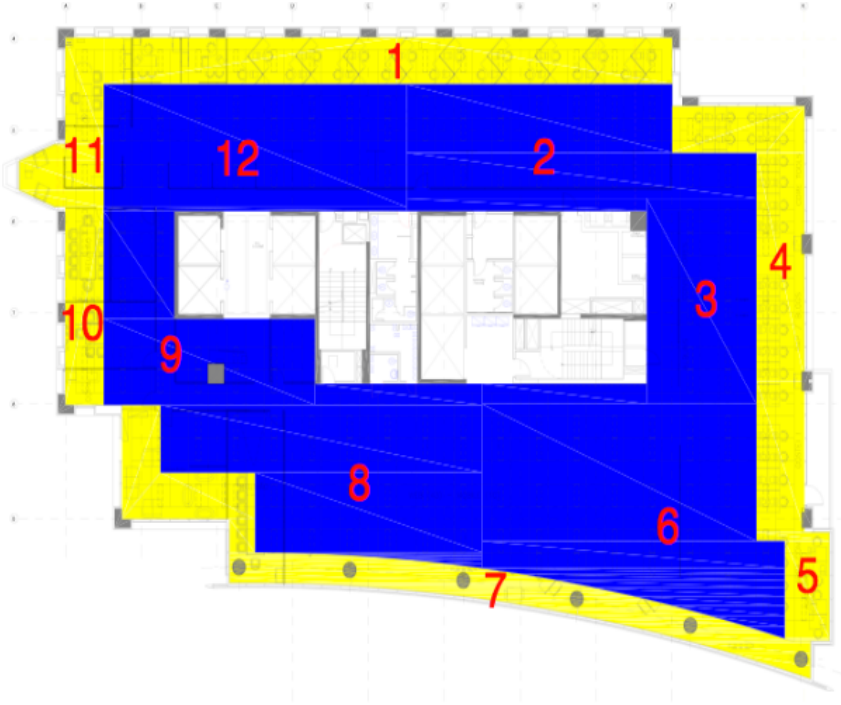
A área em azul era atendida por caixas de VAC sendo que a temperatura dessa área era resultante do balanço térmico entre a vazão de insuflamento constante à temperatura de insuflamento constante e a carga térmica da área (quando havia variação na carga térmica a temperatura do ambiente também variava), ou seja, não havia controle de temperatura nessa área.

No 2º pavimento, foi instalada uma sanca próxima à VAC-77. Isso provocou a retirada de seis difusores deste dispositivo, que resultou em um aumento de vazão que foi distribuído pelos difusores vizinhos.

No 18º pavimento, a VAV-162/172 não foi localizada (provavelmente foi retirada). Nesse local, havia um estúdio não previsto no projeto. Uma sala adjacente, de controle do estúdio, também não prevista em projeto foi instalada.

No 20º pavimento, havia diferenças significativas comparando-se com o projeto. No pavimento havia oito VAVs e seis VACs, enquanto o projeto indicava 14 VAVs e nove VACs.

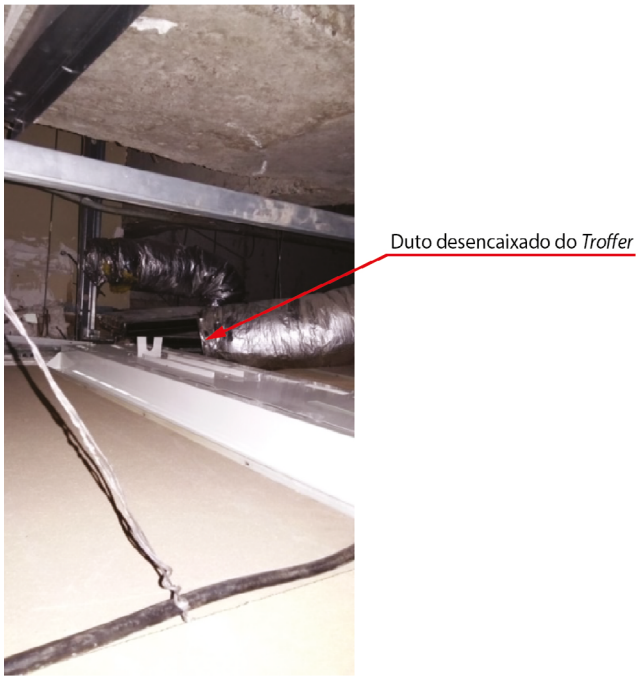
Figura 23 – Posições das caixas de VAV e VAC no pavimento (números em vermelho) e as áreas atendidas pelas VAVs (amarelo) e VACs (azul)



Fonte: Elaboração do autor.

O encaminhamento das redes de dutos de todos os pavimentos amostrados estava coerente com o projeto. Porém, observou-se em todos os pavimentos, que vários colarinhos/caixas estavam desencaixados das luminárias (como ilustrado na foto da Figura 24), passando a insuflar no forro, o que significa um total desperdício de energia referente à parcela insuflada no forro e o desconforto na área ocupada.

Figura 24 – Duto desencaixado do *Troffer* na luminária – Ar insuflado no forro



Fonte: Somar Engenharia Ltda

4.3 VERIFICAÇÃO DE OPERAÇÃO – CENTRAL DE ÁGUA GELADA

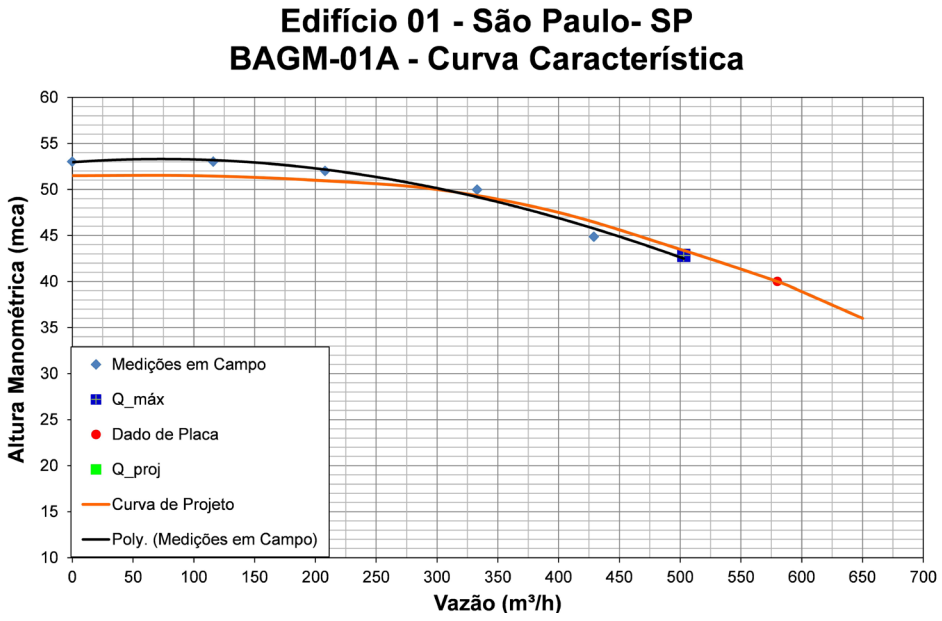
4.3.1 TESTES OPERACIONAIS – BOMBAS

Os resultados dos testes das **BAGMs** indicaram que as curvas características obtidas em campo eram praticamente iguais à curva de catálogo do fabricante, em toda sua extensão. No entanto, as BAGMs não atingiram a vazão de projeto atual do circuito de água gelada (547 m³/h), porque as válvulas de bloqueio manual (utilizadas para o balanceamento hidrônico) dos *Fan Coils* estão muito restringidas.

Portanto, será necessário refazer o balanceamento do circuito, mas somente após a instalação de válvulas de balanceamento nos condicionadores de ar, onde será possível realizar o balanceamento adequado e diminuir a perda de carga total da instalação.

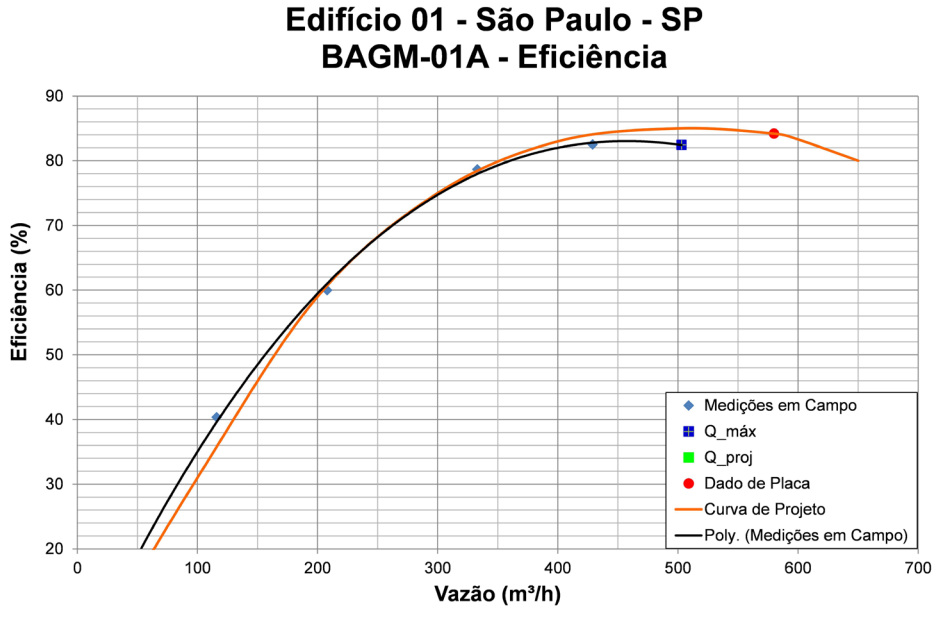
Os Gráficos 10 e 11 indicam os resultados do levantamento da curva característica da **BAGM-01A** obtida em campo, em comparação com os valores de projeto:

Gráfico 10 – BAGM-01A – Curva Característica



Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 11 – BAGM-01A – Eficiência

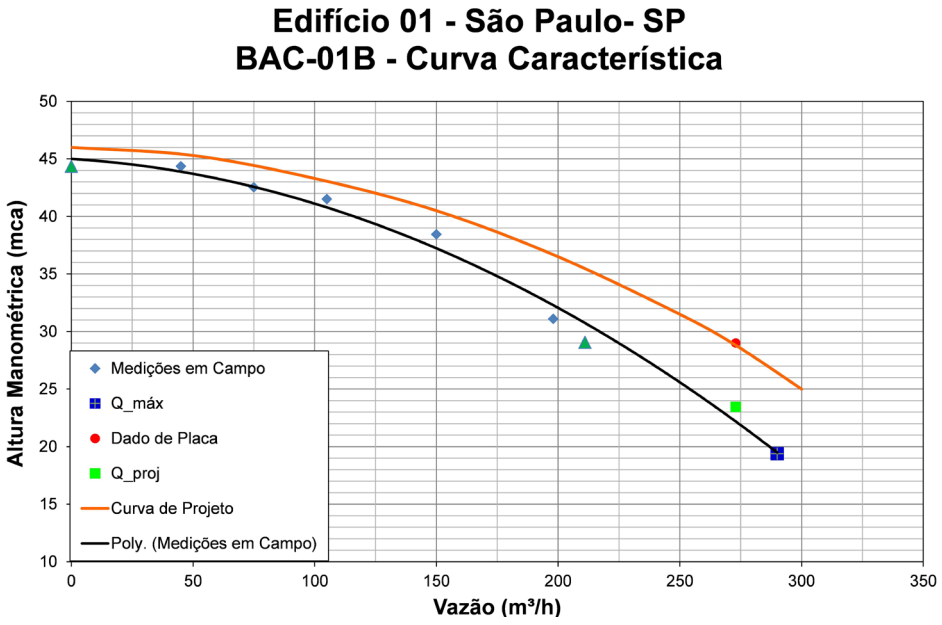


Fonte: Elaboração do autor.

As **BAC-01B** e **BAC-01R** (que atendem os *Chillers* UR-01A e UR-01B) apresentaram curvas características bem abaixo da curva de catálogo do fabricante, principalmente na faixa de operação dos *Chillers*. Os resultados indicaram que as BACs estavam fora dos limites de tolerância e operavam com um consumo de energia cerca de 20% acima do valor de projeto.

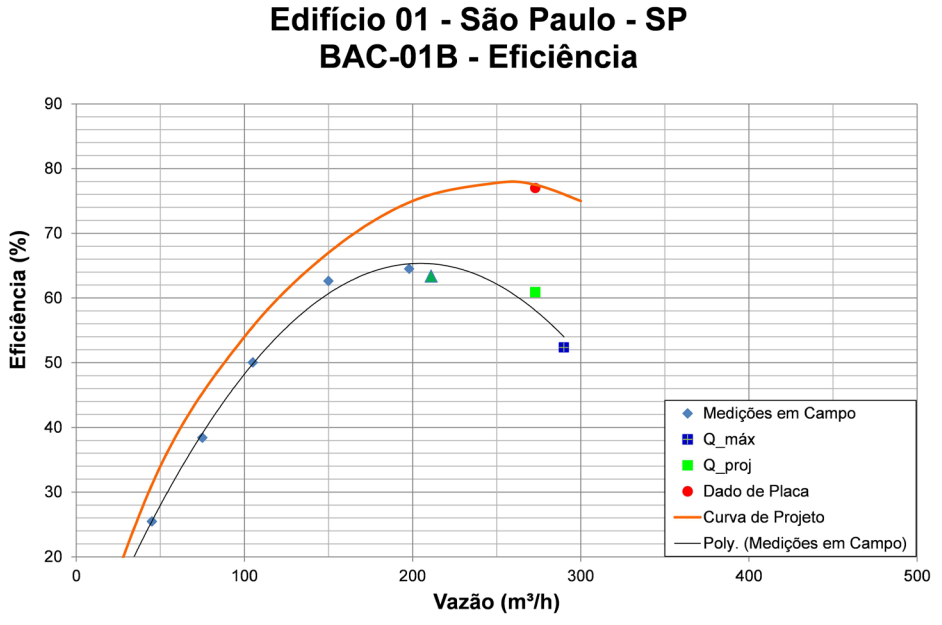
Os Gráficos 12 e 13 indicam os resultados do levantamento da curva característica da BAC-01B obtida em campo, em comparação com os valores de projeto:

Gráfico 12 – BAC-01B – Curva Característica



Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 13 – BAC-01B – Eficiência



Fonte: Elaboração do autor.

As **BAGX-01**, **BAGX-02**, **BAC-03A** e **BAC-03R** apresentaram curvas características praticamente iguais à curva de catálogo do fabricante, em toda sua extensão. Os resultados finais indicaram que essas bombas estavam operando conforme as características de projeto.

4.3.2 TESTES OPERACIONAIS – TORRES DE RESFRIAMENTO

Os resultados dos testes operacionais indicaram que a TR-03 estava com um desempenho praticamente igual ao de projeto com desvio menor que 2%.

No entanto, os resultados dos testes operacionais das torres TR-01 e TR-02 indicaram um índice de desempenho pior, da ordem de 20% abaixo nas verificações comparativas das torres com a simulação.

Os Gráficos 14 a 17 indicam alguns resultados da TR-03, seguidos da TR-02, nos quais se verificou as diferenças no desempenho considerando a operação em conjunto com o UR-01B.

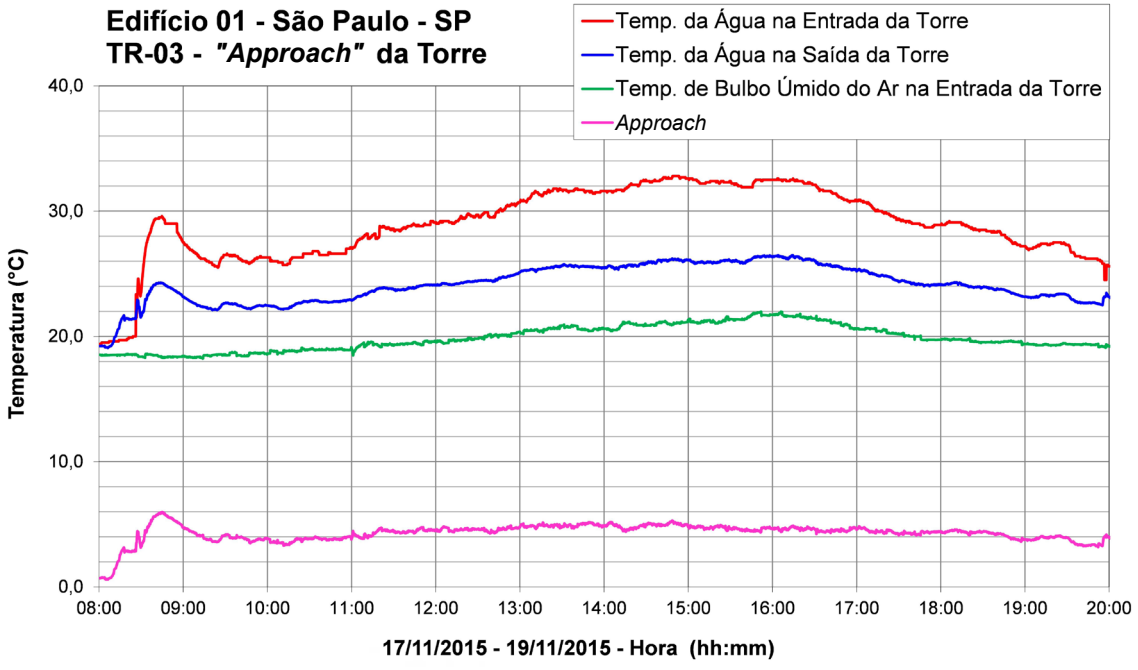
Nas análises comparativas, para a máxima capacidade, verificou-se que o "*approach*" na TR-03 (Gráfico 15) estava cerca de 1,5 ºC menor que as demais torres de resfriamento. Isso resultou em menor temperatura de entrada no condensador do *Chiller* e reduziu o consumo de energia no *Chiller* da ordem 5%.

Na análise de projeto dos ventiladores, foi verificado que os motores das TR-01 e TR-02 (mais antigas) eram de potência nominal maior e o valor da potência ativa medido em campo foi de aproximadamente 16 kW. Na TR-03, a potência ativa verificada foi de aproximadamente 10 kW.

Na análise de operação, quando o UR-01B operava a plena carga com a TR-03, a potência total era de aproximadamente 290 kW. Quando o UR-01B operava a plena carga com a TR-01 ou TR-02, a potência total aumentava para aproximadamente 310 kW.

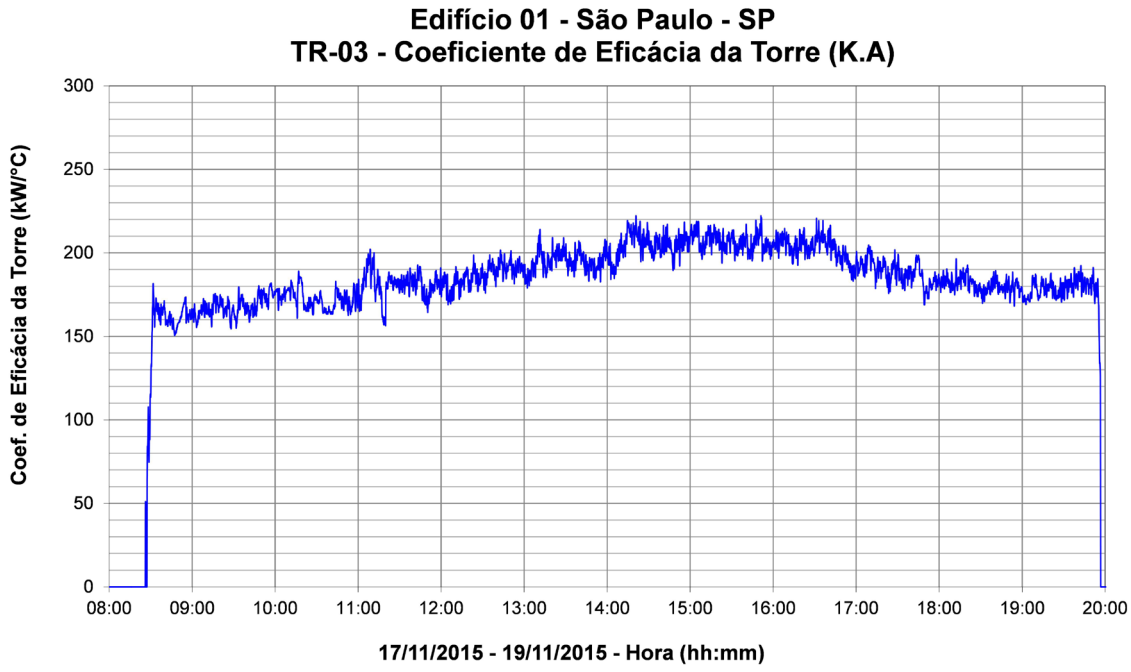
Com o edifício funcionando com ocupação plena, estima-se que o consumo anual extra da TR-01 (ou TR-02) seja da ordem de 55 **MWh** em relação à TR-03.

Gráfico 14 – TR-03 – "*Approach*" da torre



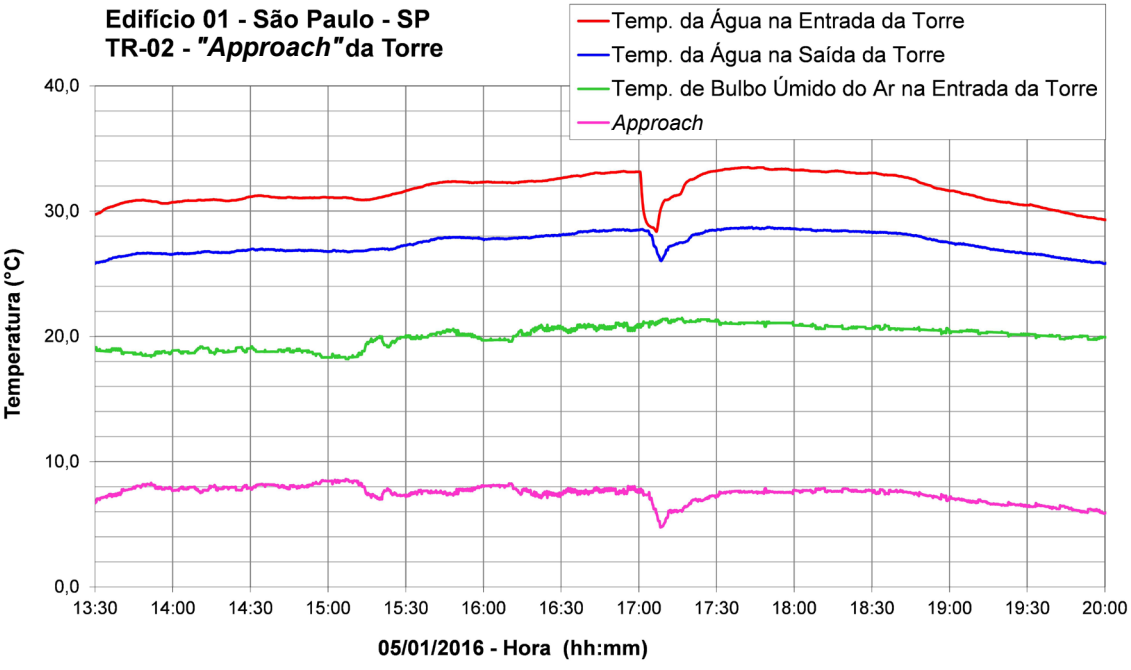
Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 15 – TR-03 – Coeficiente de Eficácia da torre (K.A)



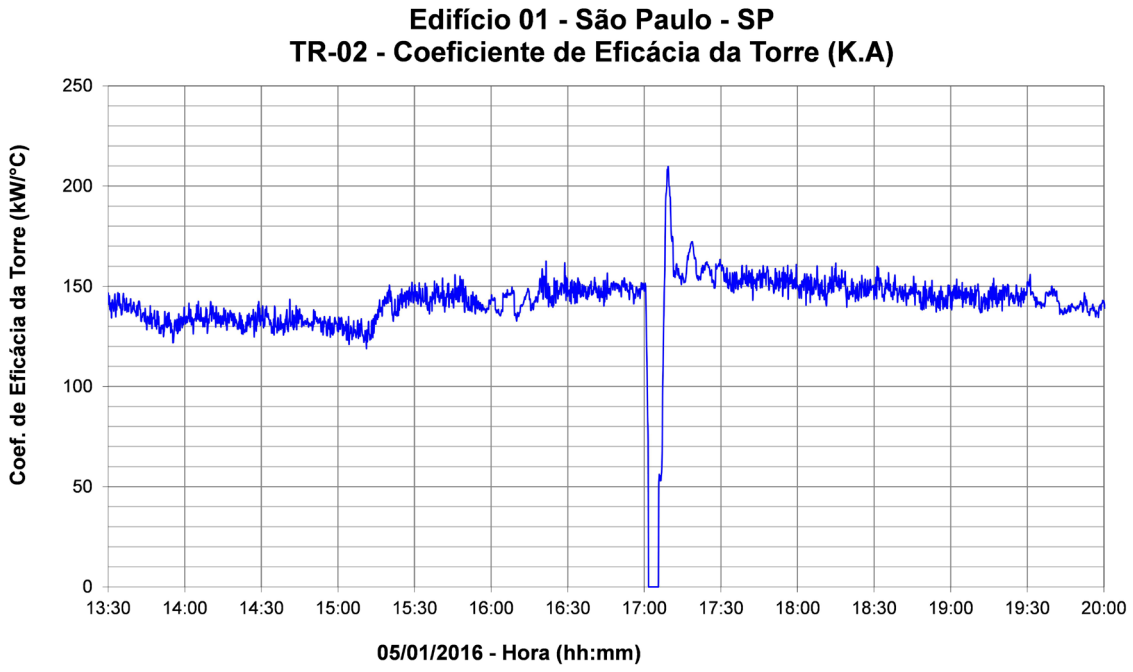
Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 16 – TR-02 – "*Approach*" da torre



Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 17 – TR-02 – Coeficiente de Eficácia da torre (K.A)



Fonte: Elaboração do autor.

4.4 VERIFICAÇÃO DE OPERAÇÃO – SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE AR NOS PAVIMENTOS

4.4.1 BALANCEAMENTO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE AR

Conforme verificado em campo, o sistema não estava balanceado em nenhum dos pavimentos observados. Porém, havia dispositivos de ajustes de vazão (colarinhos), indicando que era possível executar o balanceamento.

No 10º pavimento, a vazão total verificada no *Fan Coil* ficou 41% abaixo do valor de projeto. A rotação do ventilador estava insuficiente devido ao escorregamento das correias nas polias, cujo ruído podia ser observado em campo.

O *damper* corta-fogo do duto de ar externo permaneceu fechado, mesmo após o acionamento do *Fan Coil*. Isso prejudica a renovação do ar do pavimento, o que poderia afetar a saúde do usuário.

No 18º pavimento, a vazão total verificada no ***Fan Coil*** ficou 27% abaixo do valor de projeto. No 20º pavimento, a vazão total verificada no *Fan Coil* ficou 44% abaixo do valor de projeto.

Verificou-se em alguns pavimentos que algumas caixas de difusão estavam desencaixadas dos difusores com o objetivo de eliminar o fluxo de ar frio indesejável e melhorar o conforto dos usuários (como indicado na Figura 24). Isso afeta o desempenho do *Fan Coil* e de todo o sistema de distribuição de ar, pois o ar insuflado no forro se mistura com o fluxo de ar de retorno e diminui a temperatura de entrada de ar no *Fan Coil*.

Alguns difusores estavam vedados com fitas adesivas colocadas pelo usuário, como indicado na Figura 25.

4.4.2 TESTES OPERACIONAIS – VAVs E VACs

Nos pavimentos verificados, as caixas de VAC eram acionadas em conjunto com o acionamento do motor do ventilador do *Fan Coil* e mantidas na posição totalmente aberta. Assim, a vazão de ar nas caixas de VAC era resultante da variação da pressão de insuflamento. Quanto maior a pressão de insuflamento, maior a vazão nesses dispositivos.

Figura 25 – Fitas Adesivas colocadas pelos usuários bloqueando o fluxo de ar nos difusores



Fonte: Somar Engenharia Ltda.

No 2º pavimento, apenas seis caixas de VAV estavam atuando em conformidade com o *setpoint* definido. As outras quatro não modulavam quando alterados os valores de *setpoint*.

No 10º pavimento, todas as caixas de VAV estavam atuando em conformidade com o *setpoint* definido.

No 18º pavimento, somente uma das caixas de VAV não estava atuando em conformidade com o *setpoint* definido.

No 20º pavimento, apenas três caixas de VAV (das oito instaladas) estavam operando em conformidade com o *setpoint* definido.

4.4.3 TESTES OPERACIONAIS – CONDICIONADORES DE AR

No *Fan Coil* do 2º pavimento, a válvula de 2 vias de controle de vazão de água gelada operava corretamente em função da temperatura de insuflamento e o inversor de frequência atuava conforme alteração do *setpoint* de pressão. Porém, o *Fan Coil* não respondeu aos comandos de ligar ou desligar pelo sistema supervisório.

No *Fan Coil* do 10º pavimento, a válvula de 2 vias de controle de vazão de água gelada operava corretamente, em função da temperatura de insuflamento, porém o inversor de frequência não estava operando e estava sem comunicação com o sistema supervisório.

No *Fan Coil* do 18º pavimento, a válvula de 2 vias de controle de vazão de água gelada operava corretamente, em função da temperatura de insuflamento e o inversor de frequência estava atuando conforme alteração do *setpoint* de pressão.

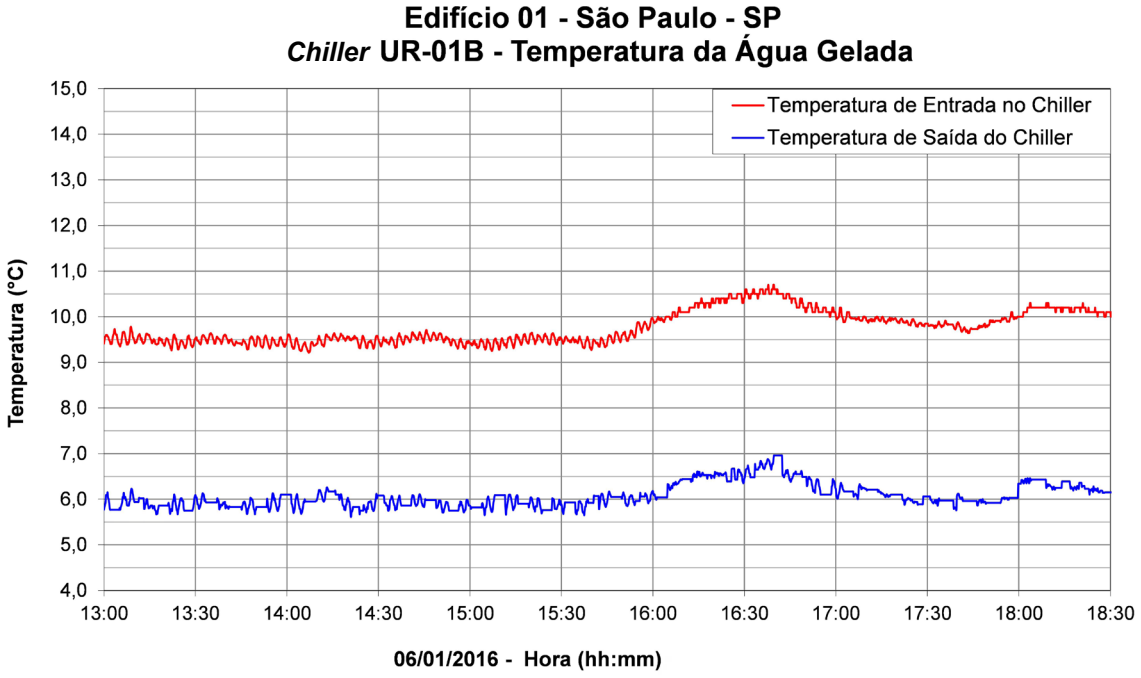
No *Fan Coil* do 20º pavimento, a válvula de 2 vias de controle de vazão de água gelada operava corretamente, em função da temperatura de insuflamento e o inversor de frequência estava atuando conforme alteração do *setpoint* de pressão.

4.5 VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO – CENTRAL DE ÁGUA GELADA

4.5.1 TESTES DE DESEMPENHO DOS *CHILLERS*

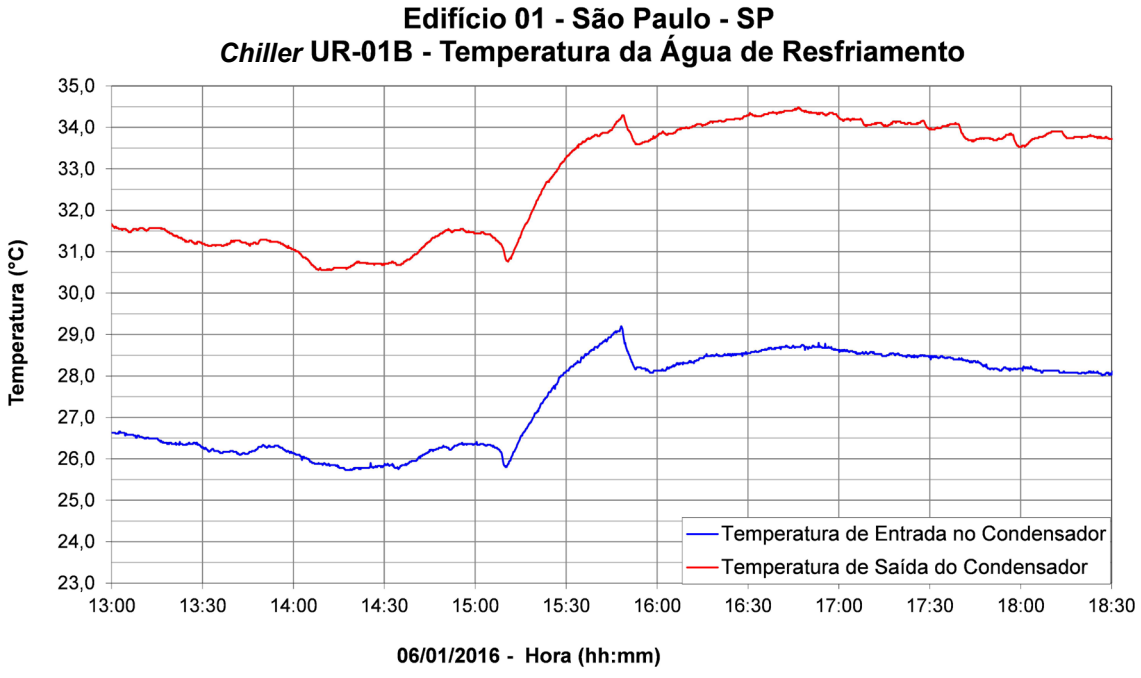
Foram realizados os testes de desempenho dos *Chillers* UR-01B e UR-03. O UR-1A estava avariado. Os resultados indicaram que o **UR-01B** estava muito deficiente, conforme já indicava o relatório de análise de desempenho realizada em julho de 2012. Os Gráficos 18 a 21 indicam os resultados obtidos:

Gráfico 18 – *Chiller* UR-01B – Temperatura da Água Gelada



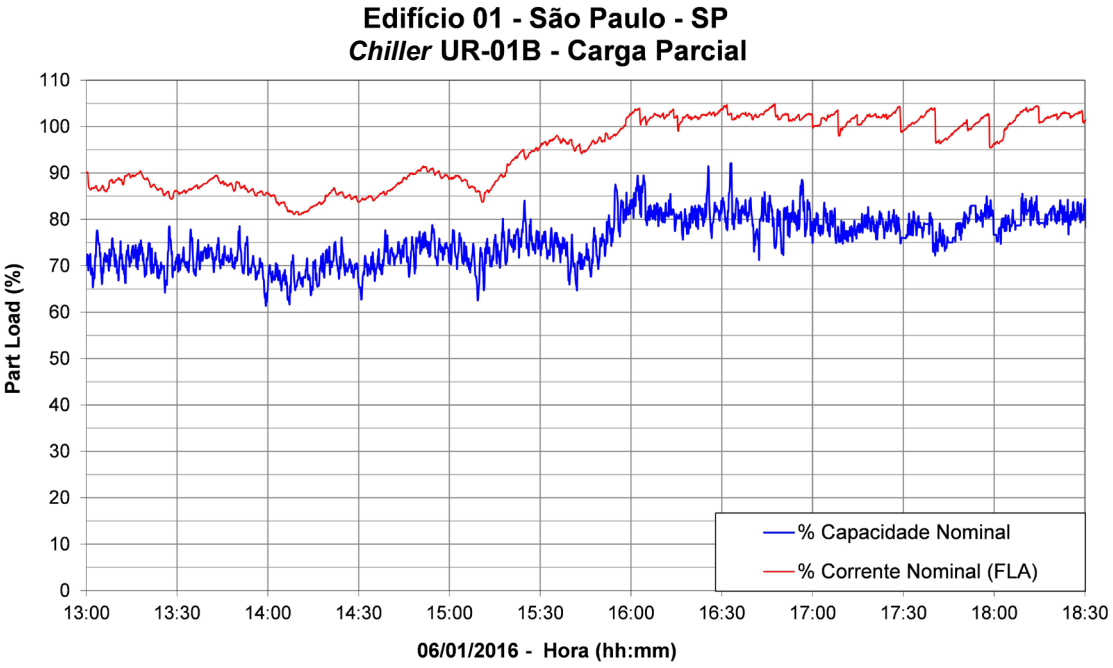
Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 19 – *Chiller* UR-01B – Temperatura da Água de Resfriamento



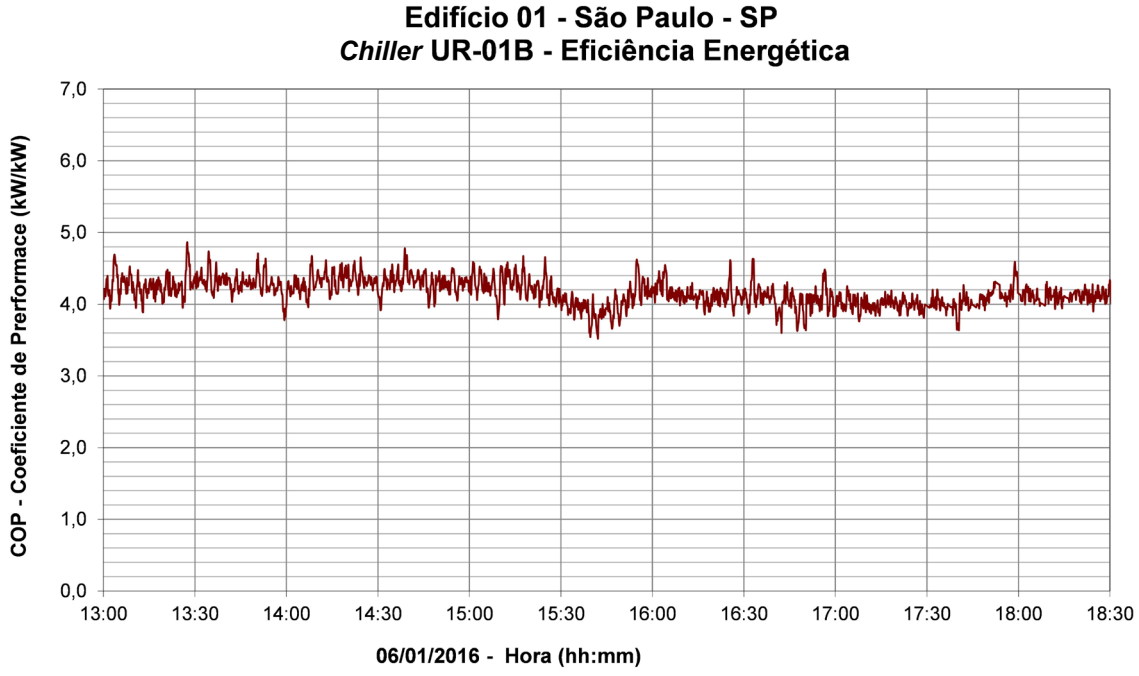
Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 20 – *Chiller* UR-01B – Perfil de Carga Parcial



Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 21 – *Chiller* UR-01B – Eficiência Energética



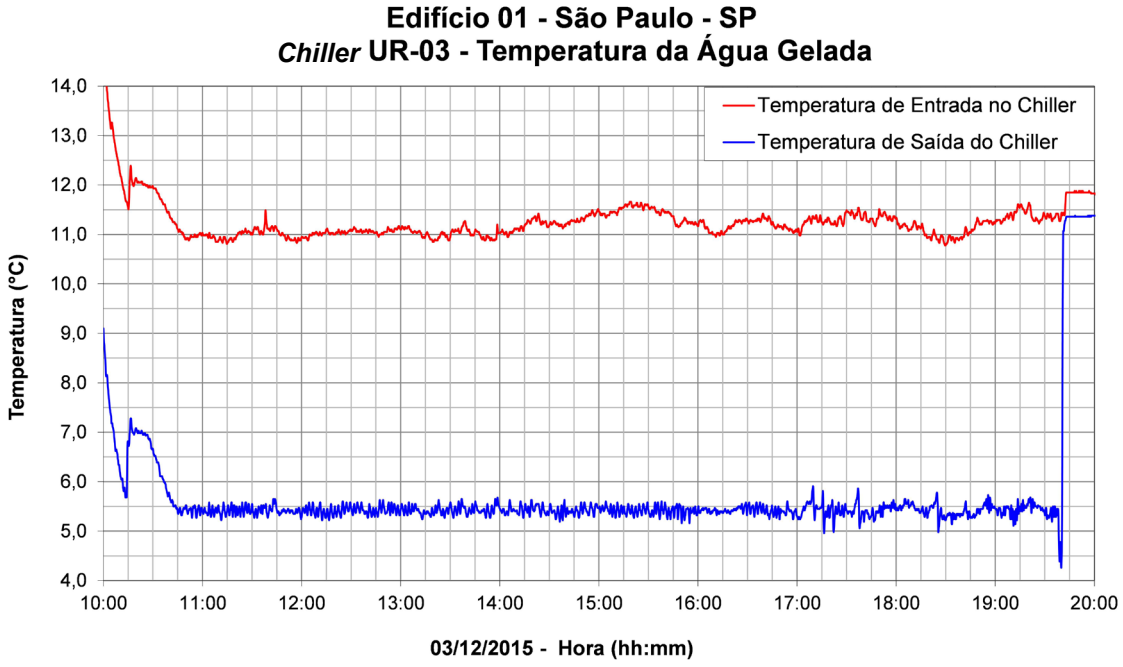
Fonte: Elaboração do autor.

A seguir, um resumo dos valores verificados nos gráficos para o *Chiller* UR-01B:

- A partir das 16h00min (Gráfico 20), o UR-01B atingiu a máxima carga, ou seja, 100% da corrente nominal do motor (FLA);
- Nesse período o *Chiller* operava com temperatura de saída de água gelada em torno de 6,0 °C (Gráfico 18), valor um pouco acima do *setpoint* de projeto, uma condição favorável para um melhor desempenho;
- A temperatura de entrada de água no condensador estava abaixo de 29,0 °C (Gráfico 19), outra condição favorável para um melhor desempenho;
- Nessas condições, o *Chiller* atingiu uma capacidade em torno de 80% da capacidade nominal (Gráfico 20), porém esse era o limite do equipamento;
- Finalmente, o COP verificado nessas condições foi de aproximadamente 4,05 kW/kW (Gráfico 21), menor valor que o verificado na análise realizada em julho de 2012 (4,26 kW/kW).

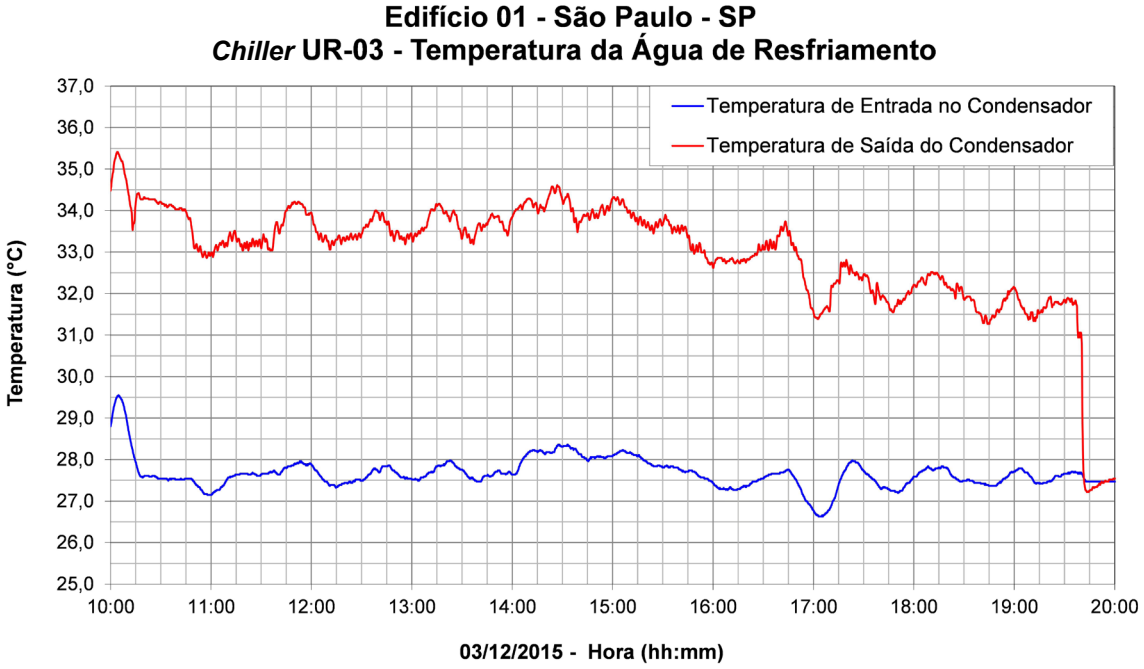
Quanto ao *Chiller* **UR-03**, os resultados indicaram que o desempenho estava praticamente igual às condições de projeto. Os Gráficos 22 a 25 indicam os resultados obtidos:

Gráfico 22 – *Chiller* UR-03 – Temperatura da Água Gelada



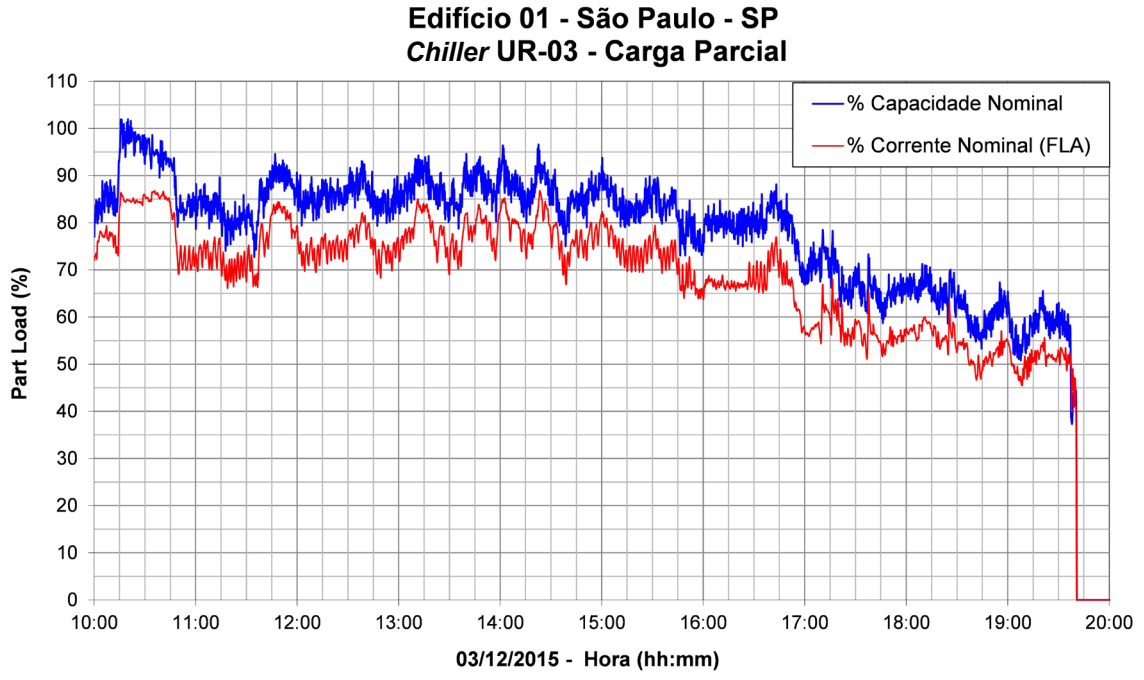
Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 23 – *Chiller* UR-03 – Temperatura da Água de Resfriamento



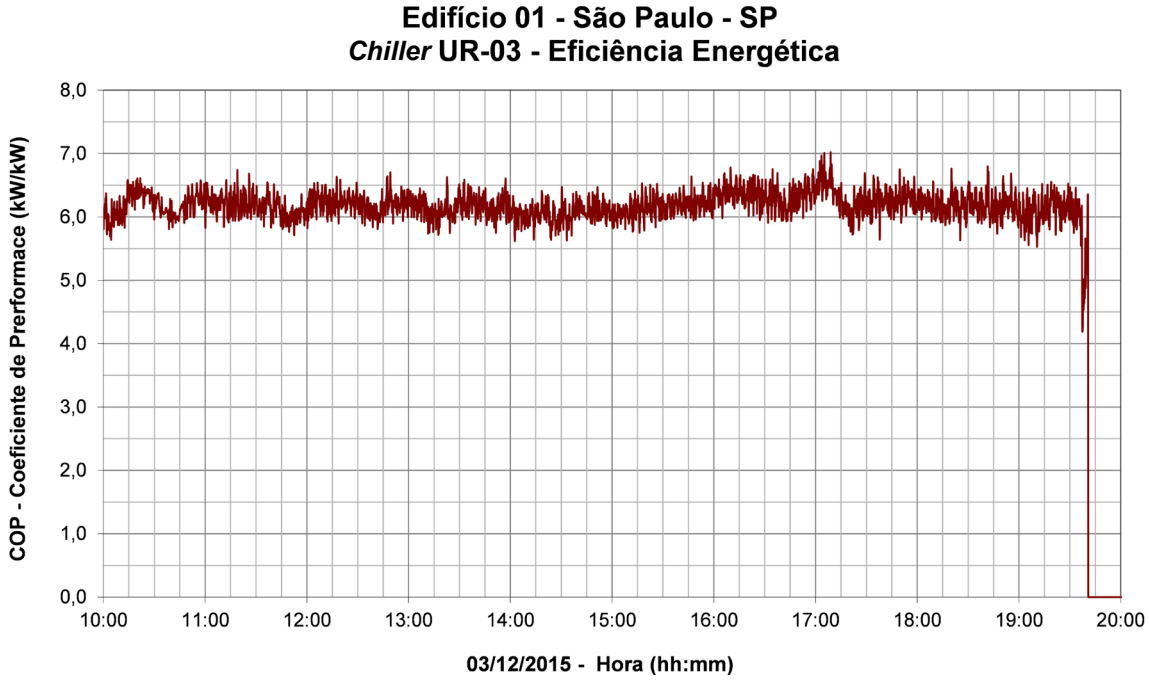
Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 24 – *Chiller* UR-03 – Perfil de Carga Parcial



Fonte: Elaboração do autor.

Gráfico 25 – *Chiller* UR-03 – Eficiência Energética



Fonte: Elaboração do autor.

A seguir, um resumo dos valores verificados nos gráficos:

- A partir das 11h00min, o UR-03 atingiu o valor do *setpoint* de controle de temperatura de água gelada (Gráfico 22);
- O *Chiller* não atingiu a condição de carga máxima em nenhum momento (Gráfico 24), mas, diferente do UR-01B, a curva da porcentagem de capacidade estava sempre acima da curva de porcentagem da corrente nominal do motor (FLA), indicando que o *Chiller* operava com desempenho superior;
- Nesse período o *Chiller* operava com temperatura de saída de água gelada em torno do valor de *setpoint* de projeto inicial, 5,5 ºC (Gráfico 22);
- A temperatura de entrada de água no condensador estava muito próxima do valor de projeto para esse equipamento (27,7 ºC) na condição de máxima carga (Gráfico 23); É importante observar que na composição do NPLV, as temperaturas de referência são mais baixas quando o *Chiller* opera em carga parcial;
- Nessas condições, o *Chiller* atingiu uma capacidade em torno de 85-90% da capacidade nominal, com a corrente sempre menor, entre 75-80% (Gráfico 24);
- Finalmente, o COP verificado nessas condições foi de aproximadamente 6,15 kW/kW (Gráfico 25), valor maior que o de projeto operando em condições similares (5,92 kW/kW).

Comparando o desempenho dos *Chillers*, recomendou-se priorizar a operação do UR-03, mesmo em carga parcial. Na prática, o UR-01B deveria entrar em operação apenas quando o UR-03 estivesse operando com carga inferior a 35% (925 kW).

4.5.2 TESTE DE DESEMPENHO FUNCIONAL DA CENTRAL DE ÁGUA GELADA EM MODO AUTOMÁTICO

Não foi possível realizar o teste de desempenho funcional da CAG operando em modo automático, controlado totalmente pelo sistema de automação.

O sistema operava em modo manual remoto apenas, com algumas manobras operacionais neces-

sariamente realizadas manualmente em campo. As principais causas da operação manual eram as seguintes:

- A válvula motorizada de bloqueio de fluxo de água gelada do UR-01B estava com o atuador avariado. Para funcionamento e parada do UR-01B era necessário realizar a abertura ou o fechamento da válvula manualmente em campo;
- As válvulas motorizadas de bloqueio de fluxo de água de resfriamento das torres de resfriamento TR-01 e TR-02 estavam avariadas. Para evitar mais manobras, foi realizado um ajuste para que a válvula da TR-02 permanecesse sempre aberta e a válvula da TR-01 permanecesse sempre fechada. Com a operação do UR-01B, funcionava apenas a TR-02. Se necessário operar o UR-03 (que necessita de duas torres), era então acionada automaticamente a válvula motorizada da TR-03 que operava normalmente. Em caso de falha em uma das torres, era necessário acionar o operador para realizar a manobra manual em campo para permitir a operação da TR-01.

O sistema iniciava a operação com o *Chiller* UR-01B. Durante o dia, a equipe de operação do sistema de automação monitorava o funcionamento do *Chiller* e caso atingisse a máxima carga, com a temperatura de saída de água gelada superior a 6,0 ºC, então era solicitada a parada do UR-01B (com o fechamento manual da válvula de bloqueio) e acionada a partida do UR-03. Na prática, não havia um controle visual adequado e era comum verificar o UR-01B operando em 100% de carga, com temperatura de água gelada superior a 7,5 ºC.

Durante o teste foi possível verificar ainda os seguintes desvios em relação ao memorial descritivo do projeto do sistema de automação:

- O medidor de vazão FE-01 apresentava um valor fixo de 23,8 m³/h na tela do sistema supervisório. No display do instrumento de campo, o valor estava correto (em torno de 250 m³/h). Portanto, recomendou-se uma verificação na controladora ou na conversão de valores no sistema supervisório para identificar e corrigir o erro.
- Os medidores de vazão acoplados às válvulas de balanceamento estavam descalibrados, pois foram verificados desvios de vazão nos *Chillers*.
- O sensor de temperatura TE-04 (retorno de água gelada dos condicionadores de ar) estava em falha.
- O sensor de pressão diferencial que controla a vazão de água gelada do sistema não estava funcionando adequadamente, e notoriamente opera com sobre pressão.
- As telas específicas dos *Chillers* estavam desativadas no sistema supervisório.
- Os cálculos da capacidade de cada *Chiller* e total da CAG e os cálculos de COP de cada *Chiller* e da CAG não estavam disponibilizados nas telas do sistema supervisório.

4.6 VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO – SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE AR

4.6.1 TESTE DE DESEMPENHO FUNCIONAL DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE AR NOS PAVIMENTOS EM MODO AUTOMÁTICO

Foram realizados os seguintes testes funcionais realizados no sistema de distribuição de ar nos pavimentos:

VERIFICAÇÃO DOS SENSORES

Poucos sensores de VAVs apresentaram desvios em suas leituras. Apenas o sensor da VAV-02 do 2º pavimento que não estava comunicando. Foi recomendada a calibração e ajustes dos sensores.

VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO FUNCIONAL DOS *FAN COILS*

No 2º, 18º e 20º pavimentos, os outros resultados esperados foram positivos, os inversores de frequência responderam conforme esperado.

No 10º pavimento o inversor não estava comunicando com o sistema supervisório e seus resultados foram todos insatisfatórios.

Nenhum dos *Fan Coils* observados possuía o relé de corrente. Além disso, nenhum dos sensores de pressão para indicação da saturação dos filtros dos *Fan Coils* estava operando.

4.7 RESULTADOS DA INVESTIGAÇÃO E ANÁLISE DO SISTEMA

A seguir, um resumo dos principais problemas encontrados e as recomendações de ações de correção do sistema, que impactarão na eficiência energética do sistema e na melhoria do controle de temperatura dos ambientes condicionados e por consequência no conforto dos usuários dos pavimentos:

4.7.1 SISTEMA DE ÁGUA GELADA

Os principais problemas verificados no sistema de água gelada foram os seguintes:

- Documentação de projeto desatualizada, incluindo desenhos e manuais de equipamentos com características de operação de projeto. Recomendou-se que durante o projeto de substituição dos *Chillers* UR-01A e UR-01B, a empresa contratada realizasse a atualização dos documentos do projeto;
- Vibração excessiva na bomba de água gelada BAGM-01. Seria necessária uma revisão geral na bomba abrangendo verificações internas, motor elétrico, alinhamento do conjunto moto-bomba e base do *skid*;
- Os atuadores das válvulas motorizadas dos *Chillers* UR-01A e UR-01B e das torres de resfriamento TR-01 e TR-02 estavam avariados. Recomendou-se incluir a substituição dos atuadores no projeto de substituição dos *Chillers*;
- Verificou-se que várias válvulas de 2 vias para controle de vazão de água gelada nos condicionadores de ar apresentavam problemas de mal funcionamento ou estavam avariadas. Essas válvulas deveriam ser incluídas no PMOC para correção dos problemas. Outra alternativa seria a substituição de todas as válvulas de 2 vias (já no final da vida útil) por válvulas com controle otimizado do consumo de água gelada nos condicionadores de ar;
- Verificou-se também que vários inversores de frequência dos ventiladores dos condicionadores de ar apresentaram algum tipo de problema. A revisão geral dos inversores deveria ser incluída na rotina do PMOC. Recomendou-se ainda um programa de substituição dos inversores;
- O sistema de purga de ar manual no circuito de água gelada era precário. Recomendou-se a substituição por um sistema automático de purga;
- Os condicionadores de ar não possuíam válvulas de balanceamento e o sistema operava com vazão total abaixo do projeto. Recomendou-se a instalação de válvulas de balanceamento de água gelada para garantir a estabilidade operacional do circuito e possibilitar o ajuste de vazão adequado nos condicionadores;
- As bombas de água de condensação BAC-01A/B/R apresentaram um desempenho muito abaixo dos valores de projeto e com consumo de energia excessivo. Recomendou-se a substituição dessas bombas no projeto de substituição dos *Chillers*;
- As torres de resfriamento TR-01 e TR-02 apresentaram baixo desempenho com impacto no desempenho dos *Chillers*. O resultado geral é de cerca de 5% de consumo excessivo na CAG. Recomendou-se uma revisão geral nas torres TR-01 e TR-02 com substituição dos enchimentos, além de uma análise do ventilador. Outra opção seria a substituição por novas torres, mantendo apenas os gabinetes das existentes;
- O *Chiller* UR-01A estava avariado;
- O *Chiller* UR-01B estava com o desempenho ainda menor que o último teste (realizado em 2012), com COP de 4,05 kW/kW para 100% de carga em condições de projeto. Os testes confirmaram a viabilidade do projeto de substituição dos *Chillers*, que resultará em um ganho de eficiência energética no sistema de água gelada superior a 50%;
- O sistema de automação estava deficiente e não era possível operar em automático;As principais limitações eram resultantes dos problemas elétricos dos atuadores das válvulas de bloqueio dos *Chillers* e torres de resfriamento. Após a substituição dos atuadores, recomendou-se ainda realizar algumas correções no sistema supervisório e controladoras, habilitar telas específicas dos *Chillers* e incluir os cálculos para a monitoração da eficiência dos *Chillers* e da CAG.

4.7.2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE AR NOS PAVIMENTOS

- A aplicação das caixas de VAC no projeto inicial (provavelmente resultante de corte de custos de investimentos) implicou em um problema ope-

racional resultando em desconforto térmico para muitos usuários. Recomendou-se a alteração do sistema de controle de distribuição de ar, substituindo todas as caixas de VAC por caixas de VAV;

- Muitos pavimentos estavam com o sistema de distribuição de ar inadequado ao *layout* da ocupação. Recomendou-se a readequação do sistema de distribuição de ar em cada pavimento, para atender o respectivo *layout* atual de ocupação, com a atualização dos projetos como construído. Também recomendou-se a execução de um mapeamento das caixas de VAV, em função do *layout* da ocupação do pavimento, para facilitar a identificação de possíveis problemas operacionais do sistema de controle. Recomendou-se que esses mapas fossem incorporados às telas do sistema supervisório;
- Vários sensores de temperatura de ambiente apresentaram desvios de leitura maiores do que 1,0 ºC. Recomendou-se incorporar ao PMOC uma rotina de calibração dos sensores de temperatura de todo sistema de automação;
- Alguns pavimentos estavam com os sistemas de distribuição de ar desbalanceados, muitos deles resultantes da alteração de layout de ocupação. Recomendou-se a implantação de um programa de testes, ajustes e balanceamento do sistema de distribuição de ar, com definição dos novos *setpoints* do sistema de controle de temperatura dos pavimentos por meio de testes funcionais do sistema de distribuição de ar;
- Também se recomendou a verificação dos colarinhos/caixas para identificar os que estão desconectados e recolocá-los em suas posições nas luminárias para correto insuflamento do ar;
- Considerando que o edifício não está totalmente ocupado, recomendou-se fazer um ajuste de vazão de ar externo nos pavimentos ocupados, para atender os requisitos mínimos da ABNT NBR 16401:2008 – Nível 02, e ainda reduzir o consumo de energia no VC-14 em até 70%;
- Finalmente, recomendou-se a elaboração de um manual de operação do sistema de ar condicionado que descreva o funcionamento correto do sistema, os *setpoints* atuais, as capacidades dos condicionadores, a especificação dos componentes de controle e os procedimentos de operação e manutenção.

4.8 OPORTUNIDADES DE MELHORIA NO SISTEMA

Além dos problemas verificados, foram ainda verificadas algumas oportunidades de melhorias no sistema atual.

4.8.1 SUBSTITUIÇÃO DOS *CHILLERS* ANTIGOS COM HCFC-22

Considerando que o sistema de termoacumulação de gelo foi desativado e os *Chillers* antigos com HCFC-22 estão no final de sua vida útil e com baixo desempenho verificado, recomendou-se a substituição por *Chillers* com compressores centrífugos, de alta eficiência, para operar nas mesmas condições do UR-03, recentemente instalado.

Com a instalação dos novos *Chillers*, haverá apenas um circuito de água gelada, com alta eficiência, e mesmo com o funcionamento dos *Chillers* no horário de ponta, o novo sistema será mais eficiente e de menor custo de manutenção que o sistema atual.

A Tabela 18 mostra os resultados de capacidade máxima e eficiência do novo sistema, comparados com o sistema atual.

Outro resultado importante é sobre a tomada de decisão do investimento para a substituição dos *Chillers*. A Tabela 19 mostra os resultados de consumo de energia atual e do TEWI, considerando que os *Chillers* com R-22 ainda permanecessem em operação por mais cinco anos e que o sistema continuasse em operação apenas com esses dois *Chillers*.

O valor estimado de redução anual de consumo de energia é de 955 MWh, com um custo anual de R$ 315.000,00. A redução estimada das emissões anuais é de 312 ton-CO_2e.

4.8.2 SISTEMA DEDICADO DE RESFRIAMENTO DE AR EXTERNO (DOAS)

Outra melhoria seria a instalação de um sistema dedicado de resfriamento do ar externo (DOAS), com um condicionador de ar dedicado para o resfriamento da parcela de ar externo (de renovação).

Tabela 18 – Capacidade máxima e eficiência – novo sistema vs. sistema atual

		Sistema em 07/2012	Sistema Atual Real (12/2015)	Retrofit – *Chillers* com HCFC-22
Capacidade Máx. do Sistema	kW	3.133	3.773	4.063
	ton	891	1.073	1.156
Capacidade Máx. dos *Chillers*	kW	2.358	3.773	4.063
	ton	671	1.073	1.156
Potência Absorvida – *Chillers*	kW	554	737	687
Potência Absorvida – TOTAL (incluindo bombas e torres)	kW	752	921	849
COP – TOTAL da CAG	kW/kW	2,815	4,097	4,786
COP *CHILLERS* UR-01A/B	kW/kW	4,256	4,050	5,910

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 19 – Consumo de energia anual e TEWI – *Chillers* com R-22 vs. *Chillers* com R-134a

Chillers	Fluido Refrigerante	GWP (AR5)	Carga de Refrigerante	SPLV	Consumo de Energia Anual	Emissões Diretas	Emissões indiretas	TEWI
		100 anos	kg	kW/kW	kWh	ton-CO_2e	ton-CO_2e	ton-CO_2e
Existentes (Parafuso)	R-22	1.760	611	3,60	1.734.253	0,0653	484	566
Novos (Centrífugo)	R-134a	1.300	461	8,01	778.790	0,0653	90	254

Fonte: Elaboração do autor.

A utilização do princípio de ar externo dedicado (DOAS) iria prover uma folga de capacidade nos *Fan Coils* dos pavimentos, pois o *Fan Coil* dedicado ao ar externo ficaria encarregado de retirar a maior parcela de calor latente.

O ***Fan Coil*** DOAS teria capacidade para resfriar e desumidificar o ar externo na vazão de projeto, de 81.875 m³/h.

A capacidade total dos *Fan Coils* era de 3.973 kW. Considerando um fator de calor sensível médio de 0,83, a parcela de calor latente era de 676 kW (192 ton).

Para 99% das horas do ano, a temperatura máxima de bulbo seco é de 31,0 °C, com temperatura de bulbo úmido de 20,4 °C. Para a vazão total de ar externo e a temperatura de alimentação de água gelada de 6,0 °C, a capacidade total do *Fan Coil* de DOAS seria de 1.000 kW (284 ton), com 382 kW (109 ton) de calor latente.

Isso supriria 57% da capacidade latente necessária, reduzindo a carga dos *Fan Coils* dos pavimentos, que passaria a possuir uma folga de capacidade.

O duto de ar externo possui dimensões limitadas e, portanto, não há a possibilidade de aumentar significantemente a vazão do ar externo.

4.8.3 *CHILLER* PARA SISTEMA DEDICADO DE RESFRIAMENTO DE AR EXTERNO (DOAS)

Além dos benefícios da melhoria da qualidade do ar nos ambientes climatizados, este conceito re-

Tabela 20 – Capacidade máxima e eficiência – novo sistema com DOAS vs. sistema atual

		Sistema em 07/2012	Sistema Atual	*Retrofit Chillers*	Sistema DOAS
Capacidade Máx. do Sistema	kW	3.133	3.825	4.063	4.063
	ton	891	1.088	1.156	1.156
Capacidade Máx. dos *Chillers*	kW	2.358	3.825	4.063	4.063
	ton	671	1.088	1.156	1.156
Potência Absorvida – *Chillers*	kW	554	723	687	623
Potência Absorvida – TOTAL (incluindo bombas e torres)	kW	752	904	849	799
COP – TOTAL da CAG	**kW/kW**	**2,815**	**4,231**	**4,786**	**5,086**

Fonte: Elaboração do autor.

sultaria em uma pequena alteração no sistema de água gelada que permitiria um ganho de eficiência ainda maior no sistema em relação ao obtido na substituição dos *Chillers* antigos.

A Tabela 20 mostra os resultados de capacidade máxima e eficiência do novo sistema, com DOAS, comparados com o sistema atual.

4.9 PLANO DE AÇÃO DE CORREÇÕES

Os Quadros 1 e 2 apresentam o resumo do plano de ação de correções e os custos de investimento estimado.

4.9.1 SISTEMA DE ÁGUA GELADA

Quadro 1 – Capacidade máxima e eficiência – novo sistema com DOAS vs. sistema atual

Proposta de Solução	Objetivos/ Resultados	Estimativa de Custos
Substituição dos Atuadores das Válvulas de Bloqueio Motorizadas dos UR-01A/ UR-01B e TR-01/ TR-02.	Eliminar o problema e permitir o funcionamento otimizado da CAG sob o controle da automação.	Incluso na obra de Substituição dos *Chillers* UR-01A/ UR-01B.
Substituição das BACs-01A/01B/01R que atendem os *Chillers* menores.	Redução do consumo de energia na CAG da ordem de 2%.	Incluso na obra de Substituição dos *Chillers* UR-01A/ UR-01B.
Revisão de lógicas do sistema de automação, habilitação das telas dos *Chillers*. Habilitação de telas de *trends* e *benchmarks* da CAG.	Permitir controle adequado na CAG e monitorar a eficiência do sistema.	Custo de Manutenção do Sistema de Automação.
Prover documentação de projeto adequada.	Controle de engenharia sobre o sistema existente.	R$ 35.000,00

(continua)

Proposta de Solução	Objetivos/ Resultados	Estimativa de Custos
Realizar uma revisão geral na BAGM-01. Como opção verificar o custo de substituição da bomba.	Eliminar o problema e permitir o funcionamento normal da bomba.	R$ 7.000,00
Substituição das Válvulas de 2 Vias de controle de vazão de água gelada nos *Fan Coils* avariadas ou com mal funcionamento (42%), por válvulas inteligentes com controle e monitoração de consumo de energia.	Permitir controle adequado nos *Fan Coils* e redução do consumo de energia na CAG da ordem de 3%. Melhoria no conforto do usuário.	Substituição Total R$ 70.000,00 Custo por Pavimento R$ 2.700,00
Instalação das válvulas de balanceamento nos *Fan Coils*.	Redução do consumo de energia das BAGMs da ordem de 7%. Controlabilidade do Circuito Secundário	Custo Total R$ 50.000,00 Custo por Pavimento R$ 1.900,00
Incluir no PMOC um plano de revisão geral e contínuo dos inversores de frequência dos ventiladores dos *Fan Coils*. Como opção, substituir os inversores (17 anos).	Permitir controle adequado nos *Fan Coils* e redução do consumo de energia na CAG da ordem de 3%. Melhoria no conforto do usuário.	Substituição Total R$ 170.000,00 Custo por Pavimento Típico R$ 5.000,00
Instalação de um sistema de purga automático no circuito de água gelada.	Eliminar excesso de ar e problemas de corrosão.	R$ 23.000,00
Revisão geral nas torres TR-01 e TR-02 e substituição do enchimento, além de uma análise do ventilador ou substituição das torres.	Redução do consumo de energia na CAG da ordem de 5%. Redução no consumo de água das torres.	Substituição Total R$ 190.000,00

Fonte: Elaboração do autor.

4.9.2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE AR NOS PAVIMENTOS

Quadro 2 – Plano de ação de correções e os custos de investimento estimado

Proposta de Solução	Objetivos/ Resultados	Estimativa de Custos
Substituição de todas as caixas VAC por caixas VAV.	Controlar a temperatura dos ambientes.	R$ 200.000,00

(continua)

Proposta de Solução	Objetivos/ Resultados	Estimativa de Custos
Elaboração de projeto específico para cada pavimento com adequação do sistema de ar condicionado ao *layout* atual e posterior instalação das alterações.	Controlar a temperatura dos ambientes.	Depende de cada pavimento.
Calibração dos sensores de temperatura que apresentaram desvios maiores do que 1,0 ºC.	Controlar a temperatura dos ambientes.	Depende de cada pavimento.
Execução dos Ajustes e Balanceamento na Rede de Distribuição de Ar nos Pavimentos, após as correções das VAVs e de *layout*.	Controlar a temperatura dos ambientes.	R$ 11.000,00 por pavimento
Execução dos Ajustes e Balanceamento de Vazão de Ar Externo nos Pavimentos Ocupados.	Melhora e qualidade do ar nos pavimentos e reduzir o consumo de energia de até 70% no motor do ventilador de ar externo.	R$ 15.000,00
Durante a Execução do TAB, fazer o teste funcional para definição dos *setpoints*. Inserir estes *setpoints* no manual de operação do sistema.	Controlar a temperatura dos ambientes.	Incluso no custo do TAB.
Prover documentação adequada que faz parte do manual de operação, e atualizá-la à medida que novas reformas forem executadas.	Controle de engenharia sobre o sistema existente.	Depende de cada pavimento. Pode ser elaborado pelas equipes de operação/ manutenção.
Elaborar o manual de operação do sistema.	Treinar novos operadores, manter um controle de alterações de *setpoints* e controlar a operação do sistema.	R$ 17.000,00

Fonte: Elaboração do autor.

4.10 CONCLUSÕES

Após a investigação estruturada e sistematizada do sistema de ar condicionado do Edifício 1, foram identificados vários problemas de projeto, instalação, operação e manutenção do sistema que afetam o conforto ambiental e a eficiência energética do sistema.

Os resultados foram apresentados aos representantes dos proprietários e às equipes de administração, operação e manutenção do condomínio, que, após entendimento dos resultados e benefícios, decidiram que o plano de ação seria completamente implantado, em um prazo estimado de 18 meses.

Após 12 meses da apresentação do relatório, foi verificado que 75% das correções já foram implantadas.



5 PROCEDIMENTOS PARA MEDIAÇÃO E VERIFICAÇÃO (M&V) DE DESEMPENHO

Uma das principais atividades do processo de retrocomissionamento é a que trata de Medição & Verificação – M&V – pois, para que toda a base da fase de avaliação inicial e da fase de investigação e análise sejam bem fundamentadas, é necessário realizar uma série de medições e verificações para um bom conhecimento dos sistemas e seus problemas operacionais. Ainda durante essas fases, por meio da elaboração do Plano de M&V e da utilização de procedimentos e protocolos, é que será estabelecida uma referência inicial sobre o sistema atual e suas características reais de desempenho.

Ao final da fase de implementação, as atividades de M&V são fundamentais para a verificação dos objetivos do processo de RCx e do atendimento aos requisitos do CFR. Por fim, por meio do processo de comissionamento contínuo, as atividades de M&V continuam sendo essenciais para a manutenção dos índices de desempenho alcançados e para a identificação de novas oportunidades de melhorias nos sistemas.

Assim, a aplicação de procedimentos e protocolos para M&V dos sistemas prediais tem como principal objetivo fundamentar o que se chama de desempenho a fim de estabelecer credibilidade sobre os resultados. Com isso, é possível criar uma avaliação do desempenho medido e verificado (do inglês, *benchmark*), de maneira adequada, rigorosa e confiável e garantir que os ganhos com eficiência energética não diminuam a qualidade do ambiente interno (IEQ).

5.1 CATEGORIAS DE MEDIÇÃO

O manual ***Performance Measurement Protocols for Commercial Buildings***, publicado pela ASHRAE, trata especificamente dos protocolos para medição de desempenho de sistemas prediais em edifícios comerciais e estabelece os objetivos, a métrica (incluindo instrumentação necessária, abrangência e resolução espacial e temporal) e os *benchmarks* apropriados para as seguintes categorias de medição:

- Consumo de Energia;
- Consumo de Água Potável;
- IEQ – Conforto Térmico;
- IEQ – Qualidade do Ar Interior (QAI);
- IEQ – Iluminação / Luz Natural;
- IEQ – Acústica.

Os níveis de medição e verificação em campo e o tipo de análise podem ser de nível básico, com um resultado de análise apenas indicativo, nível intermediário, que envolvem diagnósticos de equipamentos, e sistemas e nível avançado, com características investigativas, tipicamente utilizadas no processo de retrocomissionamento.

A principal diferença está na qualidade final do resultado obtido, porém, quanto melhor o resultado, maior será o investimento no processo de M&V.

A seguir, o descritivo das categorias de medição relacionadas ao sistema de ar condicionado.

5.1.1 CONSUMO DE ENERGIA

Os principais objetivos da M&V relacionados ao consumo de energia são os seguintes:

- Caracterizar o perfil de consumo de energia no edifício e seus custos;
- Estabelecer um ranking de desempenho energético;
- Estimar potenciais de economia de energia.

A métrica adotada pode envolver uma análise genérica sobre a caracterização do perfil de consumo de energia até medições específicas do perfil de consumo de energia dos *Chillers*, CAG e motores dos ventiladores dos condicionadores de ar do sistema.

Uma CAG aplicada em um sistema de ar condicionado de um edifício possui um perfil de desempenho muito complexo, pois além das variações climáticas há ainda a influência da variação da taxa

de ocupação ao longo do dia e eventualmente, em caso de vacância de pavimentos, a variação dessa taxa pode ser substancial se estender por períodos mais longos.

Além disso, em sistemas antigos e deficientes, na ocasião do período de M&V da CAG existente, é muito comum verificar que a temperatura de saída de água gelada para alimentação dos condicionadores de ar está razoavelmente acima do *setpoint* de projeto e que as áreas climatizadas apresentam algum desvio (temperatura elevada, umidade relativa elevada, tomadas de ar externo fechadas para "economizar energia" e evitar aumento de temperatura nos ambientes). E isso pode ocorrer por diferentes causas as quais nem sempre estão relacionadas com o baixo desempenho dos *Chillers* (capacidade máxima abaixo do valor de projeto), pois normalmente os *Chillers* são superdimensionados.

Portanto, em casos de M&V para projetos de renovação no sistema de ar condicionado (incluindo a substituição de *Chillers*) é essencial que as medições de consumo de energia que servirão de referência sejam associadas ao perfil de carga térmica atual e à eficiência energética (COP), e não às contas de energia, pois após a implantação do novo sistema, poderá haver um aumento do perfil de carga térmica (e a melhoria no conforto térmico), o que resultará em um aumento do consumo de energia em relação ao que se poderia esperar de redução considerando o perfil de carga quando funcionava o sistema antigo. Isso pode ocorrer de tal maneira que o impacto na redução da conta de energia seja bem menor do se podia esperar considerando apenas o consumo de energia dos equipamentos antigos.

Apesar de ser importante realizar a M&V no nível básico para a categoria de consumo de energia (atividade típica de auditoria de energia) em edifícios com sistema de ar condicionado, é fundamental que haja uma análise mais ampla envolvendo diagnósticos e investigações, principalmente quando se busca uma classificação energética do edifício ou quando na ocasião de um projeto de renovação do sistema de ar condicionado.

5.1.2 CONFORTO TÉRMICO

Os protocolos de M&V na categoria de conforto térmico visam determinar e classificar os níveis de satisfação dos ocupantes e servem como referência principal para identificar os problemas relacionados ao conforto térmico.

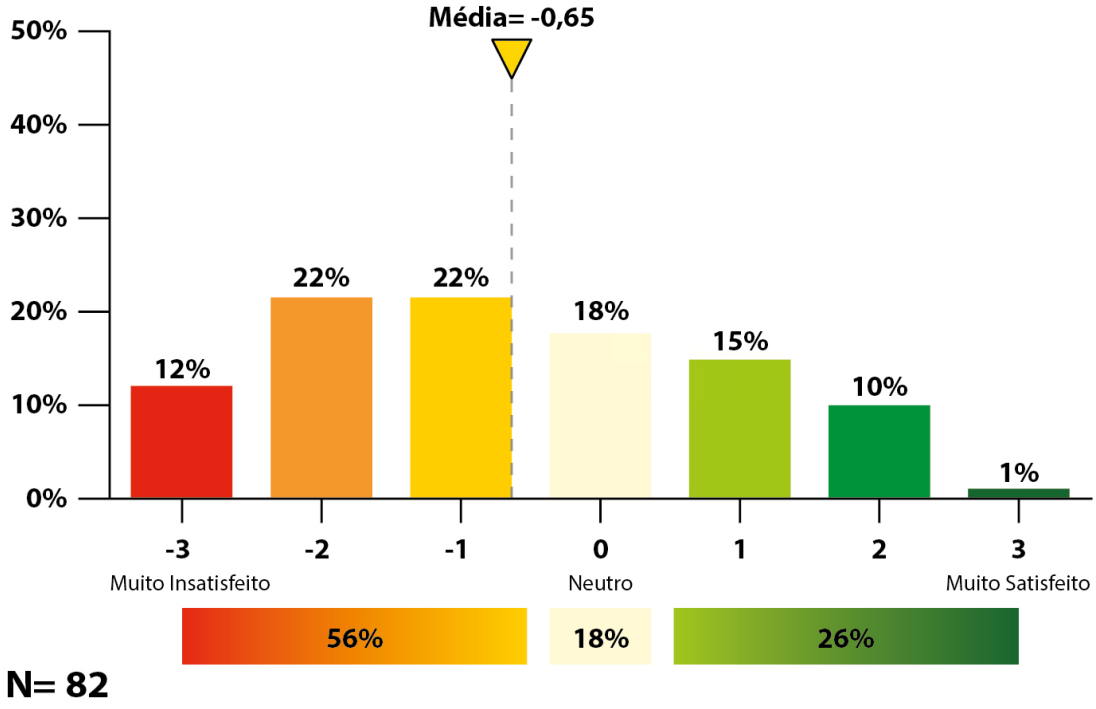
Apesar de muito subjetiva, a satisfação dos ocupantes relacionada ao conforto térmico é fundamental para a aceitabilidade de todo o sistema de ar condicionado. É importante enfatizar que, se houver desconforto nos ambientes, toda eficiência energética do sistema de ar condicionado será apenas desperdício de energia.

As métricas para avaliação do conforto térmico envolvem as seguintes M&Vs:

- Listas de chamados de reclamações quanto ao desconforto térmico;
- Pesquisas de satisfação dos usuários e equipes de operação, aplicadas em formas de questionários de avaliação padronizados (a NBR 16401 Parte 2 – Conforto Térmico – possui alguns exemplos);
- Monitoração das condições ambientes (temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do ar e temperatura radiante) em período simultâneo às pesquisas (para determinar eventuais causas de problemas).

Os Gráficos 26 e 27 apresentam os resultados de pesquisas de satisfação dos usuários sobre o conforto térmico realizadas no edifício sede da ASHRAE, em Atlanta, nos EUA, antes e após uma renovação substancial no sistema de ar condicionado.

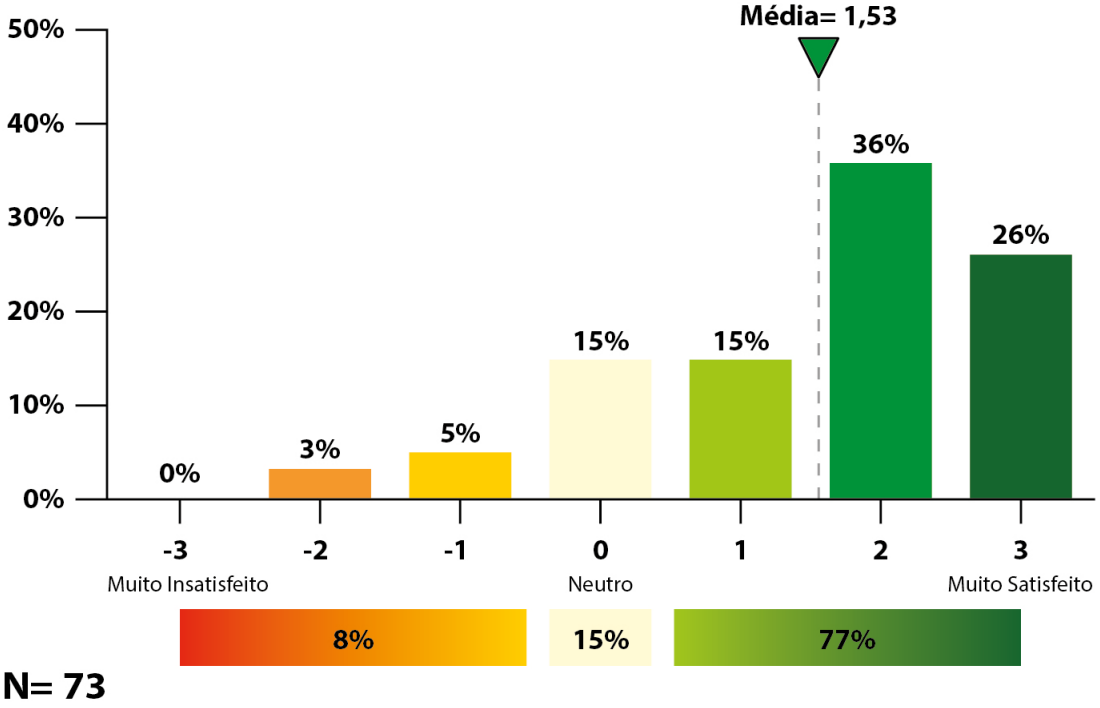
Gráfico 26 – Resultado da pesquisa de satisfação dos ocupantes realizada posterior à renovação do sistema de ar condicionado (2010) – 26 % satisfeitos



N= 82

Fonte: HUNN, 2016.

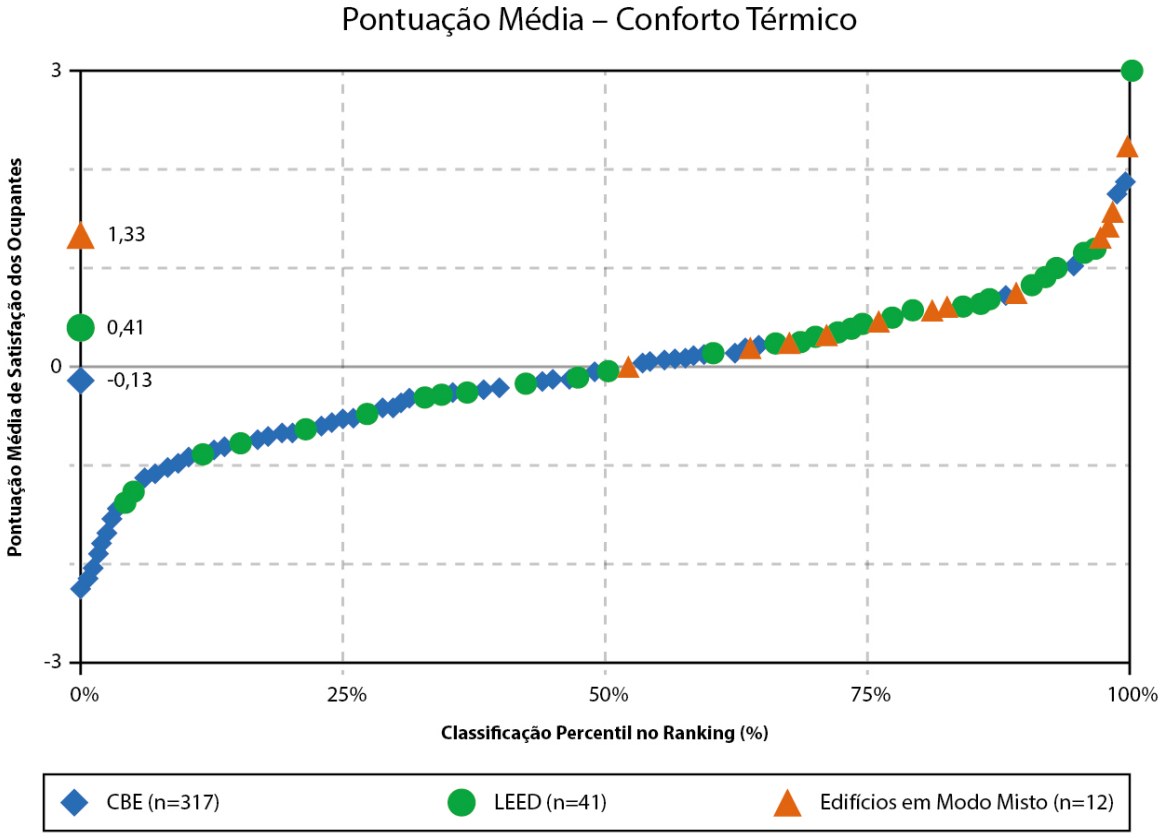
Gráfico 27 – Resultado da pesquisa de satisfação dos ocupantes realizada posterior à renovação do sistema de ar condicionado (2010) – 77 % satisfeitos



N= 73

Fonte: HUNN, 2016.

Gráfico 28 – Classificação Percentil de Edifícios da Base de Dados do CBE na categoria de conforto térmico



Fonte: HUNN, 2016.

O Gráfico 28, de frequência cumulativa, mostra a classificação percentil de 370 edifícios da base de dados do CBE (*Center for the Built Environment – University of California, Berkeley*), com a pontuação média de cada edifício na categoria de conforto térmico. Ou seja, indica qual a média de satisfação dos ocupantes daquele edifício (eixo Y) e qual a posição (porcentual) do edifício no *ranking* da base de dados (eixo X).

Os círculos em verde indicam os edifícios com certificação LEED. Os triângulos em laranja indicam os edifícios com sistemas de ar condicionado que operam em modo misto (ou híbrido) incluindo ar condicionado (sistema de água gelada) e/ou ventilação natural (em alguns casos ventilação mecânica também). Os losangos em azul representam os demais edifícios no banco de dados.

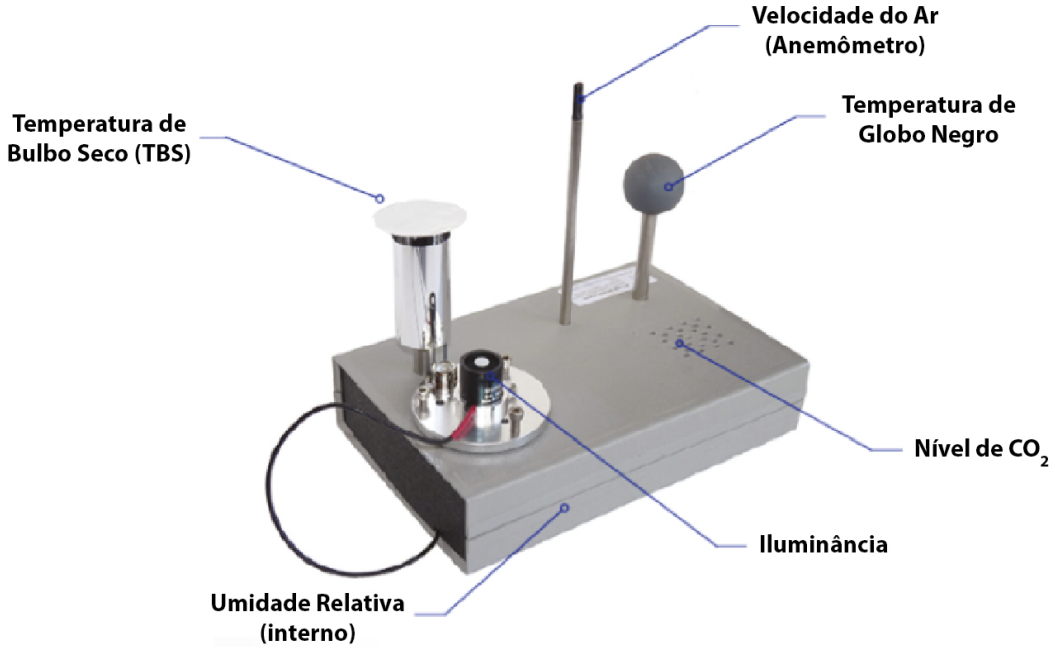
A mediana da pontuação de satisfação para cada um desses grupos aparece indicada nos símbolos coloridos no eixo y.

As Figuras 26 e 27 mostram estações de M&V (portátil de mesa e móvel) das principais grandezas das condições ambientes, incluindo TBS, velocidade do ar, TGN, nível de CO_2, iluminância e umidade relativa do ar.

5.1.3 QUALIDADE DO AR INTERIOR

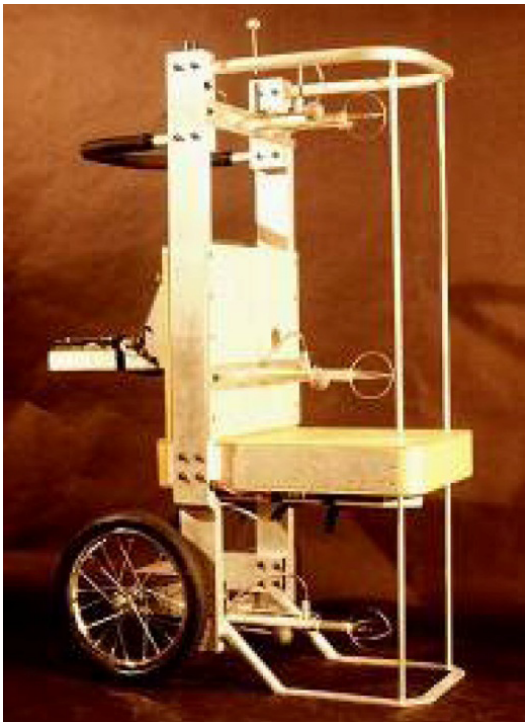
A qualidade do ar interior está intimamente ligada ao conforto térmico, porém do ponto de vista da saúde humana, o que significa que a sua percepção (quando insuficiente) é evidenciada por meio de consequências indiretas (desde sonolência até absenteísmo devido a doenças respiratórias). Os objetivos da M&V também visam a classificação dos níveis de satisfação dos ocupantes, mas inclui avaliações de conformidade em relação aos requisitos das normas (no Brasil, a NBR 16401:2017 Parte 3) e a própria avaliação das condições atuais do sistema de distribuição de ar para os pavimentos.

Figura 26 – Estação de M&V portátil de mesa das principais grandezas das condições ambientes



Fonte: ARENS, 2011.

Figura 27 – Estação de M&V móvel das principais grandezas das condições ambientes



Fonte: Mark II Thermal Comfort Assessment Cart – Center for the Building Environment - The College of Environmental Design – University of California, Berkley - USA

As métricas para avaliação da qualidade do ar interior envolvem as seguintes M&Vs:

- Listas de chamados de reclamações quanto à qualidade do ar de interior;
- Pesquisas de satisfação dos usuários e equipes de operação, aplicadas em formas de questionários de avaliação padronizados (a NBR 16401 Parte 2 – Conforto Térmico – possui alguns exemplos);
- Monitoração das condições de qualidade do ar interior e do ar exterior incluindo índices de CO_2, VOCs, material particulado (PM 2,5) em período simultâneo às pesquisas (para determinar eventuais causas de problemas). Outros contaminantes podem ser monitorados quando necessário;
- Medição/monitoração das taxas de ar externo nos ambientes e eventualmente em cada tomada de ar.

5.2 NORMAS E GUIAS DE REFERÊNCIA

5.2.1 ASHRAE

A ASHRAE possui uma série de normas e guias de referência, que fornecem informações e as diretrizes sobre aspectos de manutenção dos índices de

desempenho dos edifícios e sobre a aplicação de procedimentos e protocolos relacionados à M&V. A seguir, os principais documentos (vigentes em 2016):

ASHRAE Guideline 14-2014 – Measurement of Energy, Demand and Water Savings

Fornece diretrizes para a medição confiável das economias de energia, demanda e água alcançadas em projetos de otimização de sistemas. Inclui os procedimentos para o uso de dados medidos antes e após a renovação do sistema, aplicados ao cálculo das economias de energia, demanda e água.

ASHRAE Guideline 22-2012 – Instrumentation for Monitoring Central Chilled Water Plant Efficiency

Define os métodos recomendados para M&V do perfil de carga térmica da Central de Água Gelada e o consumo de energia e para calcular a eficiência da dos *Chillers* e da CAG. Inclui recomendações para métodos e dispositivos usados para medir o consumo de energia dos equipamentos, vazão de água gelada/água de resfriamento, temperaturas no sistema e procedimentos para a aquisição dos dados necessários ao cálculo da eficiência energética do sistema.

ANSI/ASHRAE/IES Standard 100-2015 – Energy Efficiency in Existing Buildings

Esta norma fornece critérios que irão resultar em redução no consumo de energia por meio da melhoria da eficiência energética e do desempenho em edifícios existentes.

É direcionada para o desenvolvimento de procedimentos e programas essenciais à otimização energética dos sistemas prediais envolvendo operação, manutenção, gerenciamento e monitoramento dos índices de eficiência energética e traz os requisitos necessários para o aumento da eficiência dos sistemas, incluindo a envoltória do edifício.

ANSI/ASHRAE Standard 105-2014 – Standard Methods of Determining, Expressing and Comparing Building Energy Performance and Greenhouse Gas Emissions

Esta norma destina-se a fomentar uma convergência na determinação e padronização de relatórios de desempenho energético dos edifícios, a fim de facilitar a comparação de estratégias de otimização e/ou melhorias operacionais em edifícios, bem como o desenvolvimento de padrões de desempenho energético dos edifícios e relatórios de emissão de gases do efeito estufa associados com a operação dos sistemas.

Ela fornece um método consistente de determinar, expressar e comparar o desempenho energético de edifícios novos e existentes e as emissões de gases com efeito de estufa associadas à concepção de novos edifícios e à operação de edifícios existentes.

ANSI/ASHRAE/ACCA 180-2012 – Standard Practice for Inspection and Maintenance of Commercial-Building HVAC Systems

Esta norma estabelece os requisitos mínimos de inspeção e manutenção de sistemas de ar condicionado para que estes atendam aos requisitos iniciais do projeto do sistema relacionados ao conforto térmico, qualidade do ar interior e eficiência energética em edifícios comerciais.

5.2.2 EVO/PIMVP

A ***EVO – Efficiency Valuation Organization*** possui os manuais sobre o ***Protocolo Internacional de Medição e Verificação do Desempenho Energético (PIMVP)***, composto em três volumes:

EVO 10000–1:2012 (Br) – Volume I – Conceitos e Opções para a Determinação da Economia de Energia e de Água (Português)

Define a terminologia e sugere boas práticas para documentar a eficácia dos projetos de eficiência energética e de consumo eficiente de água, implantados em edifícios e instalações industriais. Estes termos e práticas ajudam os gestores a preparar Planos de *M&V* que especificam como a economia será medida em cada projeto. O Plano de *M&V* bem-sucedido permite a verificação, ao exigir relatórios transparentes do desempenho energético real do projeto.

Volume II – Concepts and Practices for Improved Indoor Environmental Quality, 2001

Aborda as questões de Qualidade do Ambiente Interno que podem ser influenciadas por um projeto

de eficiência energética. Aborda a necessidade da concepção de um bom projeto e da implementação de práticas para manter condições dos ambientes aceitáveis em um projeto de eficiência energética. Orienta quanto aos meios de medição dos parâmetros de qualidade do ambiente interno, para comprovar se as condições dos ambientes sofreram algum prejuízo após a implantação das medidas de melhorias de eficiência energética.

Volume III – Applications
Part I – Concepts and Practices for Determining Energy Savings in New Construction
Part II – Concepts and Practices for Determining Energy Savings in Renewable Energy Technologies Applications

Contém manuais de orientação de aplicação específica para o Volume I. Os manuais de aplicação dizem respeito à construção de novos edifícios (Parte I) e à integração de energias renováveis, em instalações já existentes (Parte II). Este volume encontra-se em contínuo desenvolvimento, uma vez que cada vez mais são definidas aplicações específicas.

5.3 PLANOS DE M&V E PIMVP

Os planos de M&V e o protocolo aqui apresentados estão baseados na estrutura definida pelo **EVO 10000–1:2012 (Br) – Protocolo Internacional de Medição e Verificação do Desempenho Energético (PIMVP) Volume I – Conceitos e Opções para a Determinação de Economias de Energia e de Água (*EVO – Efficiency Valuation Organization*)**. Os documentos originais foram traduzidos para o português por Fernando Milanez e revisados por Agenor Garcia, em um projeto executado pelo Instituto Nacional de Eficiência Energética – INEE – em parceria com a EVO.

5.3.1 INTRODUÇÃO

De acordo com o PIMVP, o termo "Medição e Verificação" (M&V) refere-se ao processo de utilização de medições para determinar, de modo seguro, a economia real criada dentro de uma instalação individual por um programa de gestão de energia. A economia não pode ser medida diretamente, uma vez que representa a ausência de consumo de energia. Nesse caso a economia é determinada pela comparação do consumo medido antes e depois da implementação de um projeto, com ajustes adequados, tendo em conta alterações nas condições.

Nesse contexto, as atividades de M&V consistem em algumas ou todas as seguintes ações:

- Instalação, calibração e manutenção de medidores;
- Coleta e tratamento de dados;
- Desenvolvimento de um método de cálculo e estimativas aceitáveis;
- Cálculos com os dados medidos;
- Relatórios, garantia de qualidade e verificação de relatórios por terceiros.

O processo e o Plano de M&V devem incluir os seguintes passos:

- Considerar as necessidades do usuário sobre os relatórios de M&V;
- Selecionar a opção do PIMVP mais consistente com o objetivo de medidas de correções e melhorias que serão implementadas e em função do grau de precisão e do orçamento para a M&V;
- Decidir se o ajuste de todas as quantidades de energia será feito para as condições do período de determinação da economia ou para outro conjunto de condições;
- Decidir a duração do período de M&V do sistema de referência inicial (*baseline* – sistema anterior à implementação das medidas de melhorias) e a duração do período de aferição das economias;
- Reunir dados relevantes de energia e operação do período de referência inicial e registrá-los de modo que possam ser consultados no futuro;
- Atualizar o Plano de M&V, com inclusão dos resultados das atividades anteriores para a definição das atividades de campo;
- Conceber, instalar, calibrar e pôr em funcionamento a instrumentação de medição específica necessária, como parte da concepção final e instalação das medidas de melhorias;
- Certificar-se que, após a execução medidas de melhorias, as economias propostas serão alcan-

çadas, por meio de verificações operacionais (comissionamento);

- Reunir dados de energia e funcionamento do período de determinação da economia, como definido no Plano de M&V;
- Calcular a economia de energia e monetária de acordo com o Plano de M&V;
- Reportar as economias de acordo com o Plano de M&V.

5.3.2 OPÇÕES DO PIMVP

O PIMVP fornece quatro opções de M&V para determinar a economia (A, B, C e D). A escolha entre as opções depende das características de todo o processo. Se for necessário determinar a economia para todo sistema (toda instalação), as opções C e D talvez sejam as mais apropriadas.

No entanto, se for considerado apenas o desempenho energético da própria medida de melhoria implementada (o que dependerá muito do escopo do projeto de alteração do sistema), uma técnica de medição isolada pode ser mais adequada, com a utilização das opções A ou B. Em sistemas novos, ou quando o projeto possuir análise da simulação energética, a opção D pode ser a melhor alternativa.

OPÇÕES A & B: MEDIÇÃO ISOLADA

A medição isolada das alterações permite o estreitamento da fronteira de medição a fim de reduzir o esforço requerido para monitorar variáveis independentes e fatores estáticos, quando as ações afetam apenas uma parte da instalação. No entanto, fronteiras menores do que toda a instalação requerem habitualmente medidores adicionais na fronteira de medição.

Uma vez que a medição não é feita em toda a instalação, os resultados das técnicas de medição isoladas das melhorias não podem ser correlacionados com o consumo de energia total da instalação, registrado nas faturas da concessionária. Mudanças na instalação para além da fronteira de medição, e não relacionadas com as melhorias implementadas, não serão reportadas pelas técnicas de medição isoladas, mas incluídas no consumo ou desempenho energético medido pela concessionária.

As opções de medição isolada do consumo de energia dos equipamentos afetados por uma melhoria implementada são:

- Opção A: Medição Isolada: Medição de parâmetros-chave;
- Opção B: Medição Isolada: Medição de todos os parâmetros.

A frequência dessa verificação pode ser determinada começando-se por medições frequentes para verificar se o parâmetro é constante. Uma vez que se prove que este é constante, a frequência da medição pode ser reduzida. Para manter o controle da economia, à medida que a frequência da medição diminui, inspeções frequentes ou outros testes podem ser realizados para verificar o funcionamento adequado.

A medição contínua fornece maior certeza da economia reportada e mais dados acerca do funcionamento dos equipamentos. Essa informação pode ser utilizada para melhorar ou otimizar o funcionamento dos equipamentos em uma base de tempo real, melhorando desse modo o benefício da própria medida de melhoria implementada.

OPÇÃO C: TODA A INSTALAÇÃO

Toda a instalação implica a utilização de medidores da concessionária, medidores de toda a instalação, ou submedidores, para avaliar o desempenho energético de toda a instalação. A fronteira de medição inclui toda a instalação ou grande parte desta. Essa opção determina a economia coletiva de todas as medidas de melhorias implementadas aplicadas à parte da instalação monitorada pelo medidor de energia. Além disso, uma vez que são usados os medidores de toda a instalação, a economia reportada com a opção C inclui os efeitos positivos ou negativos de todas as alterações feitas na instalação, não relacionadas com as medidas de melhorias implementadas.

A opção C destina-se a projetos em que a economia esperada é significativa, comparada com as variações de energia aleatórias ou inexplicáveis ocorridas em nível de toda a instalação e é a mais recomendada para projetos de renovação de Centrais de Água Gelada, porém implica em maior quantidade de dados a serem monitorados.

Devido à influência das condições climáticas ao longo do ano sobre o desempenho de um sistema de água gelada, quanto mais longo for o período de determinação da economia após implementação das

medidas de melhorias, melhor será a verificação do impacto das variações climáticas.

Além das condições climáticas, outras variáveis devem ser medidas e registradas ao mesmo tempo que os dados de consumo de energia em uma CAG. Por exemplo, o perfil de carga térmica (que irá variar também em função da taxa de ocupação), e as condições de temperatura e vazão de água gelada e água de resfriamento (quando aplicável), e dos dados das condições dos ambientes climatizados, conforme já mencionado no item 5.1.

A opção C aplica-se melhor quando:

- O desempenho energético de toda a instalação precisa ser avaliado, não apenas o das medidas de melhorias implementadas;
- Existem muitos tipos de medidas de melhorias implementadas em uma instalação;
- As medidas de melhorias implementadas implicam em atividades cujo consumo individual de energia é difícil de medir separadamente;
- A economia é grande, comparada com a variação dos dados do *baseline*, durante o período de determinação da economia;
- As técnicas de medição isoladas (opção A ou B) são excessivamente complexas, por exemplo, quando efeitos interativos ou interações entre AEEs são substanciais;
- Não são previstas grandes mudanças futuras na instalação durante o período de determinação da economia;
- Podem-se encontrar correlações razoáveis entre o consumo de energia e outras variáveis independentes.

OPÇÃO D: SIMULAÇÃO CALIBRADA

A opção D, Simulação Calibrada, implica a utilização de um *software* de simulação energética do sistema (ou do edifício) a fim de prever o consumo de energia da instalação. Um modelo de simulação deve ser "calibrado" para prever um padrão de consumo de energia que corresponda aproximadamente aos verdadeiros dados medidos.

A opção D pode ser usada para avaliar o desempenho energético de todas as medidas de melhorias implementadas em uma instalação, semelhantemente à opção C. No entanto, a ferramenta de simulação da opção D permite também estimar a economia atribuível a cada melhoria implementada.

A opção D também pode ser usada para avaliar apenas o desempenho energético de sistemas individuais em uma instalação, semelhantemente às opções A e B. Nesse caso, o consumo de energia do sistema deve ser isolado do resto da instalação por meio de medidores apropriados.

A opção D é útil onde:

- Os dados de energia do período de *baseline* não existem ou não estão disponíveis. Tal situação pode surgir pelos seguintes motivos:
  - Novo projeto de construção;
  - Expansão da instalação necessitando ser avaliada separadamente do todo;
  - Agrupamento de instalações com medição central, onde não existe nenhum medidor individual da instalação no período da linha de base, mas medidores individuais estarão disponíveis depois da implementação das melhorias;
- Os dados do período de determinação da economia não estão disponíveis ou estão obscurecidos por fatores difíceis de quantificar. Às vezes é demasiado difícil prever como as futuras alterações da instalação poderão afetar o consumo de energia. Alterações do processo industrial ou novos equipamentos tornam frequentemente o cálculo dos ajustes não de rotina tão inexato, que as opções A, B ou C criariam um erro excessivo na determinação da economia;
- É preciso determinar a economia associada a medidas de melhorias individuais, onde as medições com as opções A ou B são muito difíceis ou dispendiosas.

A Opção D é a abordagem principal de M&V para avaliar as inclusões de eficiência energética na concepção de novas instalações. O ***Volume III, Part I – Concepts and Practices for Determining Energy Savings in New Construction***, fornece orientação pormenorizada acerca de uma variedade de técnicas de M&V para novos edifícios.

A modelagem e a calibração precisas executadas por computador nos dados de energia medidos

constituem o maior desafio associado à opção D. Para controlar os custos desse método mantendo precisão razoável, deverão ser considerados os seguintes pontos quando se utilizar a opção D:

- A análise da simulação deve ser efetuada por pessoal qualificado, com experiência tanto em *software* como em técnicas de calibração;
- É fundamental que os consultores especialistas nos sistemas envolvidos estejam à frente dos serviços de modelagem, pois normalmente os especialistas em simulação energética não conhecem e/ou não estão envolvidos profundamente com o restante do processo;
- Os dados de entrada devem representar a melhor informação disponível, incluindo sempre que possível os dados reais disponíveis, relativos ao desempenho energético dos componentes-chave da instalação;
- As entradas da simulação devem ser ajustadas de modo que seus resultados correspondam aos dados da demanda e do consumo das contas mensais da concessionária, dentro de uma margem de tolerância aceitável (isto é, "calibrada"). Uma estreita concordância entre o consumo de energia anual total prevista e a real é habitualmente demonstração insuficiente de que a simulação prevê de forma adequada o comportamento energético da instalação;
- A opção D requer documentação cuidadosa. Devem existir versões em papel e eletrônicas das cópias da simulação, pesquisa de dados, e dados de medição ou monitoramento usados para definir os valores de entrada e para calibrar o modelo de simulação. O número da versão do *software* disponível deve ser declarado publicamente, de modo que outra pessoa possa rever os cálculos;
- Os esforços de modelagem para projetos de novas construções podem ser facilitados pela manutenção do modelador de energia empregado no modelo "como projetado", para criar o modelo calibrado, "como construído" e o *baseline* ajustado.

5.3.3 PLANO E M&V

No escopo do PIMVP, a preparação do Plano de M&V é a etapa recomendada para a determinação da economia. A planificação antecipada garante que todos os dados necessários para a determinação da economia estarão disponíveis após a implementação das melhorias dentro de um orçamento aceitável.

O Plano de M&V deve incluir os seguintes tópicos:

- Objetivo das medidas de melhorias a serem implementadas;
- Opção do PIMVP selecionada e fronteira de medição;
- Condições do *baseline* incluindo o período, o consumo de energia e as condições de M&V;
- Período de determinação da economia;
- Base para o ajuste;
- Procedimentos de análise, incluindo a metodologia de cálculos das economias;
- Preço da energia que serão utilizados para avaliar a economia;
- Especificações da instrumentação de M&V;
- Responsabilidades sobre o monitoramento durante o período de determinação da economia;
- Precisão esperada associada à medição, à obtenção de dados, à amostragem e à análise de dados;
- Orçamento e recursos necessários para a determinação da economia incluindo os custos iniciais estabelecidos, e os custos contínuos durante o período de determinação da economia;
- Formato dos relatórios de apresentação dos resultados;
- Procedimentos de Garantia de qualidade que serão utilizados para os relatórios de economia, e todos os passos intermediários na preparação dos relatórios.

5.3.4 RELATÓRIOS DE M&V

Os relatórios de M&V devem ser preparados e apresentados como definido no Plano de M&V e devem incluir as seguintes informações:

- Os dados observados durante o período de determinação da economia: os momentos de início e fim do período de medição, os dados de energia e o valor das variáveis independentes;

- Descrição e justificação de quaisquer correções feitas aos dados observados;
- Para a opção A, os valores estimados acordados;
- Tabela de preços da energia utilizada;
- Todos os pormenores de qualquer ajuste não periódico da linha de base efetuado. Os pormenores devem incluir uma explicação da alteração das condições desde o período da linha de base, todos os fatos observados e suposições e os cálculos de engenharia que levaram ao ajuste;
- A economia calculada em unidades de energia e monetárias.

Os relatórios de M&V devem ser redigidos para os vários níveis de entendimento de seus leitores e os gestores de energia devem rever os relatórios de M&V com as equipes de operação e manutenção. Tais revisões podem revelar informações úteis acerca da forma pela qual o sistema consome energia, ou onde o pessoal de operação pode se beneficiar de mais conhecimentos acerca das caraterísticas do consumo de energia do sistema.

5.4 METODOLOGIA DE M&V PROPOSTA PARA CÁLCULO DA ECONOMIA DE ENERGIA EM PROCESSOS DE OTIMIZAÇÃO DE CENTRAIS DE ÁGUA GELADA

A seguir, uma metodologia para M&V para o cálculo da economia em um processo de renovação de uma CAG.

5.4.1 M&V DA EFICIÊNCIA DA CAG EXISTENTE

Para a monitoração da eficiência da CAG existente, será necessária a instalação da seguinte instrumentação de campo:

- Medidores de vazão de água gelada nos *Chillers*;
- Sensores de temperatura de entrada/saída de água gelada nos *Chillers*;
- Medidores de vazão de água de resfriamento nos *Chillers*;
- Sensores de temperatura de entrada/saída de água de resfriamento nos *Chillers*;
- Medidores de energia nos painéis elétricos dos *Chillers*;
- Medidores de energia nos painéis elétricos das bombas;
- Medidores de energia no painel elétrico das torres de resfriamento (se aplicável).
- Medidores de vazão de água gelada na prumada principal de alimentação (ou retorno) para os condicionadores de ar (saída para o circuito secundário ou principal de água gelada);
- Sensores de temperatura de entrada/saída de água gelada na prumada principal de alimentação e de retorno dos condicionadores de ar.

Algumas observações:

- A M&V de cada *Chiller* pode ser realizada em período distinto, mas é importante obter dados em várias faixas de cargas parciais e em máxima carga;
- Para o levantamento do perfil de carga térmica do edifício, é muito importante que o período de M&V ocorra no verão e com a máxima taxa de ocupação possível, senão, recomenda-se uma análise (por exemplo, por meio de simulação energética);
- As medições de vazão de água gelada e de água de resfriamento nos *Chillers* servem para indicar se há variações significativas de vazão (e consumo de energia) nas BAGPs e BACs, que apesar de serem consideradas constantes no projeto, tais variações não são raras;
- A potência total da CAG é a somatória das potências dos painéis dos *Chillers*, bombas e torres de resfriamento;
- A partir dos resultados das medições e das características operacionais da CAG associados à tipologia do edifício e da sua localidade, é possível obter o SPLV (ver item 5.4 do Volume I), que será a média ponderada de COP da CAG (relação entre a capacidade total e a potência absorvida total), que servirá de valor parametrizado da eficiência energética do sistema existente.

5.4.2 M&V DA EFICIÊNCIA DA CAG APÓS A RENOVAÇÃO

Após a renovação da CAG serão realizadas novas medições, porém, recomenda-se que a instrumentação de campo seja considerada parte das medidas de melhorias durante a fase de implementação e incorporada ao sistema de automação da CAG.

A seguir, a descrição do sistema de monitoração da eficiência energética na CAG após a renovação:

- Com a monitoração dos dados da capacidade atual dos *Chillers*, com integração dos dados em função do tempo, obtém-se a energia térmica acumulada pela capacidade de cada *Chiller* ao longo do tempo. É necessário realizar esses cálculos em dois períodos distintos: durante o horário da tarifa elétrica fora da ponta e da tarifa elétrica do horário de ponta;
- O cálculo da energia térmica acumulada pela capacidade dos *Chillers* será integrado considerando um δθ de 1 minuto, com totalização instantânea (a cada minuto) e totalizações parciais diárias e mensais. A seguir a equação de cálculo da energia acumulada pela capacidade dos *Chillers* para cada período da tarifa de energia:

$$\text{Energia Térmica}_{\text{Acum Atual}} = \text{Energia Térmica}_{\text{Acum Anterior}} + Q_{\text{Atual}}/60 \ \text{(kW.h)};$$

- Com a monitoração dos dados energia térmica acumulada pela capacidade dos *Chillers*, obtém-se a somatória da energia térmica acumulada na CAG durante o período da tarifa elétrica Fora da Ponta e da tarifa elétrica do horário de Ponta, com totalização instantânea (a cada minuto) e totalizações parciais diárias e mensais;
- Com a monitoração dos dados de potência instantânea absorvida nos painéis elétricos dos equipamentos (*Chillers*, bombas e torres de resfriamento), calcula-se a potência instantânea absorvida atual da CAG;
- Com a monitoração dos dados de potência instantânea absorvida atual da CAG e da capacidade atual da CAG, calcula-se a eficiência energética atual instantânea da CAG;
- A seguir, a equação de cálculo da eficiência energética atual da CAG:

$$COP_{\text{Atual-CAG}} = Q_{\text{Atual-CAG}} / \ W_{\text{Atual-CAG}} \ \text{(kW /kW)};$$

- Com a monitoração dos dados de consumo de energia nos painéis elétricos dos equipamentos, calcula-se o consumo de energia da CAG, com totalização instantânea (a cada minuto) e totalizações parciais diárias e mensais;
- A partir da integração dos valores instantâneos de COP dos *Chillers* e da CAG, também será possível obter o SPLV real do sistema ao longo do tempo, sendo possível obter valores diários, mensais, anuais e ao longo de toda vida útil do sistema.

É muito importante que esses dados sejam disponibilizados no sistema de automação como gráficos de tendência (*trends*) em função do tempo.

5.4.3 CÁLCULO DAS ECONOMIAS

A economia será calculada pela medição das reduções de demanda e consumo na ponta e fora de ponta precificadas pelas tarifas de energia elétrica especificadas, em função do perfil de capacidade efetiva do sistema após a implementação das medidas de melhorias envolvendo a renovação da CAG.

Para os cálculos das reduções de consumo de energia após as modificações, será considerado o valor real medido de consumo de energia (kWh) após as modificações e o valor estimado de consumo de energia do sistema antigo (que não existe mais), calculado a partir da relação entre a energia térmica medida, acumulada no período (em função do perfil de capacidade efetiva atual do sistema) e o SPLV da CAG antiga.

A seguir, a equação de cálculo de consumo de energia estimado da CAG antiga para a energia térmica (com o perfil de carga térmica atual) acumulada no período:

$$\text{Consumo Energia}_{\text{CAG Antiga}} = \text{Energia Térmica}_{\text{Acum Período}} / \ \text{SPLV}_{\text{CAG Antiga}} \ \text{(kW.h)}$$

O mesmo procedimento pode ser aplicado para a definição da nova demanda (kW) da CAG a ser contratada, porém é importante realizar as medições durante o período de verão.

O objetivo é verificar qual seria o consumo de energia no período atual se o sistema antigo ainda estivesse em operação, porém atendendo os requisitos de carga térmica atuais. Dessa forma, todos os impactos do sistema com a nova CAG (impossíveis de serem previstos anteriormente) poderão ser incluídos na comparação com a CAG antiga.



6 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 (%).



7 REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16069/2010 – Segurança em Sistemas Frigoríficos**. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 16401/2008 – Instalações de Ar Condicionado – Sistemas Centrais e Unitários – Partes 1, 2 e 3**. Rio de Janeiro, 2008.

AHRI. **Performance Rating of Water-Chilling and Heat Pump Water-Heating Packages Using the Vapor Compression Cycle**. Standard 550/590 (IP) 2015. Arlington, 2015

ARENS, E. et al. **Learning from Buildings: Technologies for Measuring, Benchmarking and Improving Performance**. In: Proceedings of USGBC Greenbuild Conference. Toronto, 4-7 out. 2011.

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook – HVAC Applications**, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta, 2015a.

_____. **ASHRAE Guideline 0.2-2015 – Commissioning Process for Existing Systems and Assemblies**. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta, 2015b.

_____. **ASHRAE Guideline 1.4-2014 – Procedures For Preparing Facility Systems Manuals**. Atlanta, 2014.

_____. **ASHRAE Handbook – HVAC Systems and Equipment**, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta, 2014.

_____. **Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. Standard 90.1-2013. ANSI/ASHRAE/IESNA. Atlanta, 2013.

_____. **Method of Testing Liquid-Chilling Packages**. Standard 30-1995. ANSI/ASHRAE. Atlanta, 1995.

_____. **Performance Measurement Protocols for Commercial Buildings**. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta, 2010.

BRAGER, G., BAKER, L. **Occupant Satisfaction in Mixed-Mode Buildings**. In: Proceedings of Conference: Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge. Windsor, jul. 2008.

DAIKIN INDUSTRIES. **AG 31-002 – Application Guide – Centrifugal *Chiller* Fundamentals**. Daikin Applied, 2015.

EVO. EFFICIENCY VALUATION ORGANIZATION. **EVO 10000–1:2012 (Br)**: Protocolo Internacional de Medição e Verificação do Desempenho Energético (PIMVP) – Conceitos e Opções para a Determinação da Economia de Energia e de Água. Volume I. Tradução: Fernando C. S. Milanez. Revisão: Agenor Gomes Pinto Garcia. Toronto, 2012. 144 p.

___. **International Performance Measurement & Verification Protocol**: Concepts and Practices for Improved Indoor Environmental Quality. Volume II. Toronto, 2001.

___. **International Performance Measurement & Verification Protocol**: Applications – Part I - Concepts and Practices for Determining Energy Savings in New Construction. Volume III. Toronto, 2006.

HUNN, B. **Building Performance Measurement Protocols and their Application**. In: Workshop sobre Sistemas de Água Gelada, 2016.

MILLER, Mark F. **Existing Building Commissioning Guidelines (ASHRAE Guidelines 0.2 & 1.2)**. In: 20th National Conference on Building Commissioning Association. Nashville, maio 2012. Disponível em: < http://www.bcxa.org/ncbc/2012/_/documents/presentations/12-ncbc-2012-codes-standards-miller.pdf>. Acesso em: 1º jun. 2017.

NEBB. NATIONAL ENVIRONMENTAL BALANCING BUREAU. **Procedural Standards for Retro-Commissioning**. Maryland, 2009.

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 (cidade), set. 2013.

TOM, Steve. **Managing Energy and Comfort**. Ecolibrium Journal. Pág. 28-32. Melbourne, abr. 2009.

TRANE. **TRG-TRC010-EN – Air Conditioning Clinic - Centrifugal Water *Chillers***. Trane Heating and Air Conditioning Services & Systems, Ingersoll Rand, 2012.



8 CRÉDITOS DAS IMAGENS

Figura	Créditos
Figuras 08, 09, 10, 11	Daikin do Brasil Ltda
Figuras 12, 13, 14, 15, 17	Trane – Ingersoll Rand do Brasil Ltda
Figuras 17, 18, 19, 20, 22	Yawatz Engenharia Ltda
Figuras 16, 24, 25	Somar Engenharia Ltda
Figuras 26, 27	Center for the Building Environment – The College of Environmental Design – University of California, Berkley – USA
Arte das Figuras	Q&A Designers





Empoderando vidas.
Fortalecendo nações.

MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE

