

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**PROJETO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO
PREDIAL PARA UM SISTEMA HÍBRIDO DE
CLIMATIZAÇÃO COM ALTA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA**

Lucas Eduardo Aldrigues Machado

Brasília, Novembro de 2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

PROJETO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO PREDIAL PARA UM SISTEMA HÍBRIDO DE CLIMATIZAÇÃO COM ALTA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Lucas Eduardo Aldrigues Machado

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Banca Examinadora

Prof. Marco Antonio Freitas do Egito Coelho,
UnB/ ENE (Orientador)

Prof. João Manoel Dias Pimenta, UnB/ ENM

Prof. Gerson Henrique Pfitscher, UnB/ENE

Brasília, Novembro de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Lucas, Machado
Projeto de controle e automação predial para um sistema híbrido de climatização com alta eficiência energética ,

[Distrito Federal] 2015.

xvii, 113p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2015). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília.Faculdade de Tecnologia.

1.Automação
3.n-ZEB

2.Climatização
4.HVAC

I. Mecatrônica/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MACHADO, L. E. A., (2015). Projeto de controle e automação predial para um sistema híbrido de climatização com alta eficiência energética. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº 11/2015, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 113p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Lucas Eduardo Aldrigues Machado

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Projeto de controle e automação predial para um sistema híbrido de climatização com alta eficiência energética.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2015

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

Lucas Eduardo Aldrigues Machado

Condomínio Privê Morada Sul Módulo Q Rua 12 Casa 12 – Lago Sul

71680-352 Brasília – DF – Brasil.

Dedicatória

Dedico este trabalho a meus pais que sempre me proveram, incondicionalmente, o necessário para a formação do meu caráter e crescimento como indivíduo e como profissional.

Lucas Eduardo Aldrigues Machado

RESUMO

O presente trabalho apresenta o projeto do sistema de controle e automação da climatização do edifício n-ZEB (Net Zero Energy Building) que será construído na Universidade de Brasília. O projeto é baseado em um sistema híbrido de climatização, onde será utilizado o resfriamento evaporativo direto e o resfriamento por expansão indireta com *chiller* de condensação a ar otimizado pelos sistemas de Volume de Ar Variável (VAV) e de *free cooling*. O objetivo principal da instalação do sistema de controle e automação proposta é reduzir ao máximo os gastos energéticos desnecessários e desperdícios, de forma a garantir o gasto energético nulo resultante no edifício. São apresentados detalhes sobre o funcionamento de cada equipamento de cada sistema e de seus respectivos sensores e atuadores, para que seja possível entender o escopo do projeto. A lógica de controle é apresentada de forma generalizada, ou seja, não é feita em uma linguagem de programação específica, e deverá ser utilizada como base para o desenvolvimento da programação do sistema quando o edifício for construído. A lógica é explicada no texto e apresentada em fluxogramas (*flowcharts*) para facilitar o entendimento do sistema como um todo. Os fluxogramas utilizam uma estratégia *top-down*, são autoexplicativos e têm o objetivo de garantir um fluxo na lógica de programação utilizando as variáveis do sistema (pontos de controle e supervisão dos sensores, e equipamentos). Portanto, o projeto foi feito para servir como base em qualquer sistema de climatização que utilize estratégias semelhantes ao edifício n-ZEB e, dessa forma, apresenta informações gerais de estratégias e lógicas que podem ser utilizadas em qualquer edifício que utilize esses sistemas de climatização.

Palavras Chave: automação; climatização; n-ZEB; HVAC

ABSTRACT

The current work presents the control and automation for the air conditioning system at the n-ZEB (Net Zero Energy Building) to be built in the University of Brasília (UnB). The project is based in an hybrid acclimatization system and it will be used the direct evaporative cooling and the indirect expansion cooling with air condensation *chiller* optimized by the variable air volume (VAV) system and the free cooling system. The main objective of the installation of the control and automation system is to reduce the energetic expenditures to its minimum level, aiming to guarantee the zero energy expenditure in the building. Details about the operation of each equipment from every system and its respective sensors and actuators are presented to make it possible to understand the scope of the project. The control logic is presented in a generalized form (which means that it is not made in a specific programming language), and must be used as a base to the development of the programming when the building gets built. The logic is explained in the text and presented in flowcharts to make it easier to understand the system as a whole. The flowcharts use a top-down strategy, they are self-explanatory and are meant to guarantee a flow in the programming logic using the system variables (control and supervision points for sensors and equipment). Therefore, the project was made to be used as a basis in any air conditioning system that uses a similar strategy to the n-ZEB's. Thus, the project presents general strategical and logical information which can be used in any building using these systems, and not only in the n-ZEB from the University of Brasília.

Keywords: automation; air conditioning; n-ZEB; HVAC

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 n-ZEB – NET ZERO ENERGY BUILDING.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 METODOLOGIA E ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.	5
2 SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO POR EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSAÇÃO A AR.....	9
2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO CONFORME O TIPO DE EQUIPAMENTO UTILIZADO.....	9
2.1.1 Expansão direta.....	9
2.1.2 Expansão indireta (água gelada).....	9
2.2 UM BREVE RESUMO A RESPEITO DOS SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO MAIS CONHECIDOS NA ATUALIDADE.....	10
2.2.1 Condicionadores de ar de janela.....	10
2.2.2 Condicionadores <i>self-contained</i>	11
2.2.3 Condicionadores tipo <i>splits</i>	13
2.2.4 Condicionadores tipo <i>fan-coil/Chiller</i>	13
2.3 CHILLER COM CONDENSAÇÃO A AR COMO MODELO ADOTADO NO EDIFÍCIO OBJETO DO ESTUDO.....	14
2.3.1 Conceituação de <i>chiller</i>	14
2.3.2 Estudo comparativo entre <i>chiller</i> com condensação a água x ar.....	16
2.3.3 Componentes de um <i>chiller</i> com condensação a ar.....	17
2.3.3.1 Compressor.....	17
2.3.3.2 Condensador.....	18
2.3.3.3 Válvula de expansão.....	18
2.3.3.4 Evaporador.....	18
2.4 SISTEMA DE ÁGUA GELADA COM <i>CHILLER</i> DE CONDENSAÇÃO A AR.....	18
2.4.1 <i>Fan-Coil</i> como equipamento para a troca de calor.....	19
2.4.2 Válvulas de ação proporcional como mecanismo de regulagem de passagem de água gelada no sistema.....	20

2.4.3 Equipamentos de bombeamento de água para circulação na tubulação.....	20
2.4.4 Mecanismos de segurança do sistema: válvulas de retenção, sensor de fluxo de água, sensores de pressão e sensores de temperatura.....	21
2.4.5 Representação ilustrativa do sistema.....	23
2.5 MECANISMOS ADICIONAIS PARA UM MAIOR DESEMPENHO DO SISTEMA.....	25
3 SISTEMA DE VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV) COMO ALIADO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR EXPANSÃO COM CHILLER	26
3.1 CONCEITUAÇÃO DO SISTEMA DE VAV.....	26
3.2 COMPONENTES BÁSICOS DE UMA CAIXA VAV.....	29
3.2.1 Capa (caixa).....	29
3.2.2 Entrada.....	30
3.2.3 Saída.....	30
3.2.4 <i>Damper</i>	30
3.2.5 Eixo do <i>Damper</i>	30
3.2.6 Ventilador.....	30
3.2.7 Serpentina de reaquecimento (<i>reheat coil</i>).....	31
3.2.8 Sensor de temperatura.....	31
3.2.9 Sensor de pressão.....	31
3.2.10 Sensor de fluxo de ar.....	32
3.3 ESTRATÉGIAS PARA AUMENTO DA PERFORMANCE DO SISTEMA.....	32
3.3.1 Ligamento e desligamento ótimo.....	32
3.3.2 Otimização da pressão de ventilação.....	34
3.3.3 Otimização da ventilação com <i>free cooling</i>	36
3.3.3.1 Sensor de CO ₂	37
3.3.3.2 Sensor de presença.....	37
3.3.3.3 Cronograma de horários.....	37
3.3.3.4 Estratégia para o edifício n-ZEB: ventilação e <i>free cooling</i>	37
3.4 UMA VISÃO SOBRE AS VANTAGENS E DESVANTAGENS DO SISTEMA DE VAV.....	43
3.4.1 Vantagens.....	43
3.4.2 Desvantagens.....	44
3.5 O SISTEMA APLICADO AO MODELO PROPOSTO.....	45

4 SISTEMA DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO COMO UM INSTRUMENTO DE CLIMATIZAÇÃO PELA UMIDIFICAÇÃO.....	47
4.1 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA.....	47
4.1.1 Resfriamento evaporativo indireto.....	47
4.1.2 Resfriamento evaporativo direto.....	49
4.2 RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO ADOTADO NO EDIFÍCIO DE ESTUDO.....	52
4.2.1 <i>Dampers</i> de saída.....	53
4.2.2 Sensores de umidade.....	55
4.2.3 Bomba de água.....	55
4.2.4 Válvula de boia.....	56
4.3 SISTEMA EVAPORATIVO COMO MEIO DE ECONOMIA E SUSTENTABILIDADE.....	56
4.4 CONCLUSÃO SOBRE A ESCOLHA DO SISTEMA EVAPORATIVO.....	57
5 CONTROLE E AUTOMAÇÃO ADOTADOS PARA OS SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO.....	58
5.1 REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE ADOTADO.....	58
5.1.1 Função e funcionamento de um fluxograma.....	58
5.1.2 Representação do sistema por meio de fluxogramas.....	60
5.2 CONTROLE DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR EXPANSÃO INDIRETA COM <i>CHILLER</i> DE CONDENSAÇÃO A AR.....	62
5.2.1 Lógicas e estratégias de controle para as bombas primárias.....	62
5.2.1.1 Sistema de segurança das bombas primárias.....	63
5.2.1.2 Fluxograma do sistema de controle para as bombas primárias.....	64
5.2.2 Lógicas e estratégias originais de controle para os compressores dos <i>chillers</i>	65
5.2.2.1 Lógicas e estratégias de controle propostas para os compressores dos <i>chillers</i>	66
5.2.2.2 Sistema de segurança dos <i>chillers</i>	69
5.2.2.3 Fluxograma do sistema de controle para os <i>chillers</i>	71
5.2.3 Lógicas e estratégias de controle para as bombas secundárias.....	74
5.2.3.1 Sistema de segurança das bombas secundárias.....	75
5.2.3.2 Fluxograma do sistema de controle para as bombas secundárias.....	77

5.2.4 Lógicas e estratégias de controle das válvulas de fluxo.....	78
5.2.4.1 Sistema de segurança das válvulas de fluxo.....	79
5.2.4.2 Fluxograma do sistema de controle para as válvulas de fluxo.....	80
5.3 CONTROLE DO SISTEMA DE VOLUME DE AR VARIÁVEL.....	82
5.3.1 Lógicas e estratégias de controle para as caixas de VAV.....	82
5.3.1.1 Sistema de segurança das caixas de VAV.....	84
5.3.1.2 Fluxograma do sistema de controle das caixas de VAV.....	85
5.3.1.3 Fluxograma da segurança das caixas identificando as <i>Rogue Zones</i>	86
5.3.2 Lógicas e estratégias de controle para os ventiladores dos <i>fan-coils</i>	87
5.3.2.1 Sistema de segurança dos ventiladores dos <i>fan-coils</i>	88
5.3.2.2 Fluxograma do sistema de controle dos ventiladores dos <i>fan-coils</i>	89
5.3.3 Lógicas e estratégias do controle para o <i>free cooling</i>	90
5.3.3.1 Segurança do <i>free cooling</i>	91
5.3.3.2 Fluxograma para o <i>free cooling</i>	92
5.4 CONTROE DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO.....	93
5.4.1 Lógicas e estratégias de controle para as bombas de água e para os <i>dampers</i> de saída.....	93
5.4.1.1 Sistema de segurança do controle das bombas de água e dos <i>dampers</i> de saída.....	95
5.4.1.2 Fluxograma do controle para o sistema de resfriamento evaporativo.....	96
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO ADOTADOS.....	98
6 CONCLUSÃO.....	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
APÊNDICES.....	103
Apêndice I: Funcionamento básico de um controlador PID.....	104
Apêndice II: Lista de pontos para o controle do sistema de climatização do edifício n- ZEB.....	106
Apêndice III: Quantitativos de sensores e atuadores para os ambientes do térreo.....	108
Apêndice IV – Quantitativos de sensores e atuadores para os ambientes do 1°	

pavimento.....	109
Apêndice V – Quantitativos de sensores e atuadores para os ambientes do 2° pavimento.....	110
Apêndice VI – Disposição dos sensores na planta baixa do térreo.....	111
Apêndice VII – Disposição dos sensores na planta baixa do 1° pavimento.....	112
Apêndice VIII – Disposição dos sensores na planta baixa do 2° pavimento.....	113

LISTA DE FIGURAS

1.1	Representação do consumo ideal de um edifício n-ZEB.....	1
1.2	Modelo Tridimensional proposta pela Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, atualizado.....	3
2.1	Esquema interno de um condicionador de ar de janela.....	11
2.2	Condicionador <i>self-contained</i> com condensação a ar.....	12
2.3	Condicionador tipo <i>splits</i>	13
2.4	<i>Chiller</i> de resfriamento com condensação a ar.....	15
2.5	Funcionamento básico de um <i>chiller</i> com condensação a ar.....	17
2.6	Representação de um <i>fan-coil</i>	19
2.7	Esquema representativo do sistema de chillers de água gelada com condensação a ar para o edifício n-ZEB.....	24
3.1	Funcionamento dos <i>dampers</i>	27
3.2	Componentes básicos de um sistema VAV.....	28
3.3	Caixa de VAV real.....	29
3.4	Posicionamento dos sensores de fluxo de ar.....	32
3.5	Exemplo de ligamento e desligamento ótimo.....	33
3.6	Otimização da pressão de ventilação.....	34
3.7	Posição dos <i>dampers</i> de um edifício fictício.....	36
3.8	Tipos de monitoramento para o controle de demanda de ventilação.....	36
3.9	Sistema de VAV sem <i>free cooling</i>	40
3.10	Sistema de VAV com <i>free cooling</i>	41
4.1	Sistema de resfriamento evaporativo indireto.....	48
4.2	Sistema de resfriamento evaporativo direto.....	50
4.3	Meio moderno de contato entre a água e o ar para um sistema evaporativo direto...	50
4.4	Funcionamento dos <i>dampers</i> de saída sem utilizar o resfriamento evaporativo.....	54
4.5	Funcionamento dos <i>dampers</i> de saída utilizando o resfriamento evaporativo.....	54
5.1	Simbologia utilizada para os fluxogramas do sistema de controle do edifício n-ZEB.	60
5.2	Fluxograma do sistema de controle para bombas primárias.....	64
5.3	Fluxograma do sistema de controle para os <i>chillers</i> – parte 1.....	71
5.4	Fluxograma do sistema de controle para os <i>chillers</i> – parte 2.....	72
5.5	Fluxograma do sistema de controle para os <i>chillers</i> – parte 3.....	73

5.6	Fluxograma do sistema de controle para as bombas secundárias.....	77
5.7	Fluxograma do sistema de controle para as válvulas de fluxo – parte 1.....	80
5.8	Fluxograma do sistema de controle para as válvulas de fluxo – parte 2.....	81
5.9	Fluxograma do sistema de controle para caixas de VAV.....	85
5.10	Fluxograma do sistema de controle para caixas de VAV: “Rogue Zones”.....	86
5.11	Fluxograma do sistema de controle para os ventiladores dos <i>fan-coils</i>	89
5.12	Fluxograma do controle para o <i>free cooling</i>	92
5.13	Fluxograma do controle para o sistema de resfriamento evaporativo – parte 1.....	96
5.14	Fluxograma do controle para o sistema de resfriamento evaporativo – parte 2.....	97

LISTA DE SÍMBOLOS

Abreviações para as variáveis dos sistemas

Ax	Liga/ Desliga compressores A (x = 1 a 4)
Bx	Liga/Desliga compressores B (x = 1 a 4)
BPx	Liga/Desliga bombas primárias (x = 1 a 8)
BSx	Controla bombas secundárias (x = 1 ou 2)
BSE1.x	Liga/Desliga bombas para sistema evaporativo no 1° pavimento (x = 1 a 10)
BSE2.x	Liga/Desliga bombas para sistema evaporativo no 2° pavimento (x = 1 a 17)
BSET.x	Liga/Desliga bombas para sistema evaporativo no térreo (x = 1 a 22)
CO22.x	Estado dos Sensores de CO2 do 2° Pavimento (x = 1 ou 2)
CO2T	Estado do Sensor de CO2 do Térreo
DP1.x	Controle dos dampers da caixa de VAV do 1° Pavimento (x = 1 a 10)
DP2.x	Controle dos dampers da caixa de VAV do 2° Pavimento (x = 1 a 17)
DPB1.x	Abre/Fecha do dampers Barométricos do 1° Pavimento (x = 1 a 10)
DPB2.x	Abre/Fecha damper Barométricos do 2° Pavimento (x = 1 a 17)
DPBT.x	Abre/Fecha dampers Barométricos do Térreo (x = 1 a 22)
DPFCool1	Abre/Fecha damper de free cooling do 1° Pavimento
DPFCool2	Abre/Fecha damper de free cooling do 2° Pavimento
DPFCoolT	Abre/Fecha damper de free cooling do Térreo
DPR1.x	Abre/Fecha dampers de Retorno do 1° Pavimento (x = 1 a 10)
DPR2.x	Abre/Fecha dampers de Retorno do 2° Pavimento (x = 1 a 17)
DPRT.1	Abre/Fecha dampers de Retorno do Térreo (x = 1 a 22)
DPT.x	Controle dos dampers da caixa de VAV do Térreo (x = 1 a 22)
DSC1.x	Abre/Fecha dampers de saída comum 1° Pavimento (x = 1 a 10)
DSC2.x	Abre/Fecha dampers de saída comum 2° Pavimento (x = 1 a 17)
DSCT.x	Abre/Fecha dampers de saída comum do Térreo (x = 1 a 22)
DSE1.x	Abre/Fecha dampers de saída evaporativos 1° Pavimento (x = 1 a 10)
DSE2.x	Abre/Fecha dampers de saída evaporativos 2° Pavimento (x = 1 a 17)
DSET.x	Abre/Fecha dampers de saída evaporativos do Térreo (x = 1 a 22)
eAx	Estado dos compressores A (x = 1 a 4)
eBx	Estado dos compressores B (x = 1 a 4)
eBPx	Liga/Desliga bombas primárias (x = 1 a 8)

eBSx	Estado das bombas secundárias (x = 1 ou 2)
eBSE1.x	Estado das bombas para sistema evaporativo no 1º pavimento (x = 1 a 10)
eBSE2.x	Estado das bombas para sistema evaporativo no 2º pavimento (x = 1 a 17)
eBSET.x	Estado das bombas para sistema evaporativo no Térreo (x = 1 a 122)
eDP1.x	Estado dos dampers das caixas de VAV do 1º Pavimento (x = 1 a 10)
eDP2.x	Estado dos dampers das caixas de VAV do 2º Pavimento (x = 1 a 17)
eDPB1.x	Estado dos dampers Barométricos do 1º Pavimento (x = 1 a 10)
eDPB2.x	Estado dos dampers Barométricos do 2º Pavimento (x = 1 a 17)
eDPBT.x	Estado dos dampers Barométricos do Térreo (x = 1 a 22)
eDPFCool1	Estado do damper de free cooling do 1º Pavimento
eDPFCool2	Estado do damper de free cooling do 2º Pavimento
eDPFCoolT	Estado do damper de free cooling do Térreo
eDPR1.x	Estado do dampers de Retorno do 1º Pavimento (x = 1 a 10)
eDPR2.x	Estado do dampers de Retorno do 2º Pavimento (x = 1 a 17)
eDPRT.x	Estado do dampers de Retorno do Térreo (x = 1 a 22)
eDPT.x	Estado dos dampers das caixas de VAV do Térreo (x = 1 a 22)
eDSC1.x	Estado dos dampers de saída comum do 1º Pavimento (x = 1 a 10)
eDSC2.x	Estado dos dampers de saída comum 2º Pavimento (x = 1 a 17)
eDSCT.x	Estado dos dampers de saída comum do Térreo (x = 1 a 22)
eDSE1.x	Estado dos dampers de saída evaporativos do 1º Pavimento (x = 1 a 10)
eDSE2.x	Estado dos dampers de saída evaporativos 2º Pavimento (x = 1 a 17)
eDSET.x	Estado dos dampers de saída evaporativos do Térreo (x = 1 a 22)
eV1	Estado da válvula do fan-coil no 1º pavimento
eV2	Estado da válvula do fan-coil no 2º pavimento
eVENT1	Estado do Ventilador do fan-coil no 1º Pavimento
eVENT2	Estado do Ventilador do fan-coil no 2º Pavimento
eVENTT	Estado do Ventilador do fan-coil no térreo
eVR1.x	Estado das válvulas para reservatórios do 1º Pavimento (x = 1 a 10)
eVR2.x	Estado das válvulas para reservatórios do 2º Pavimento (x = 1 a 17)
eVRT.x	Estado das válvulas para reservatórios do Térreo (x = 1 a 22)
eVT	Estado da válvula do fan-coil no térreo
FS1.x	Fluxo de setpoint para um ambiente x no 1º pavimento
FS1.x	Fluxo de setpoint para um ambiente x no 1º pavimento
FS1.x	Fluxo de setpoint para um ambiente x no 1º pavimento

PBSx	Estado dos sensores de pressão das bombas secundárias (x = 1 ou 2)
PSBS1	Pressão de setpoint da bomba secundária 1
PSBS2	Pressão de setpoint da bomba secundária 2
PSP1	Pressão de setpoint para os dutos do 1º pavimento
PSP2	Pressão de setpoint para os dutos do 2º pavimento
PST	Pressão de setpoint para os dutos do térreo
RSBPx	Estado do relé de sobrecarga das bombas primárias (x = 1 a 8)
RSBSx	Estado dos relés de sobrecarga das bombas secundárias (x = 1 ou 2)
RSVENT1	Estado do Relé de sobrecarga do ventilador 1º pavimento
RSVENT2	Estado do Relé de sobrecarga do ventilador do 2º pavimento
RSVENTT	Estado do Relé de sobrecarga do ventilador do térreo
SFA	Estado do sensor de fluxo de água na tubulação de redundância
SFA1.x	Estado dos sensores de fluxo de ar do 1º Pavimento (x = 1 a 10)
SFA2.x	Estado dos sensores de fluxo de ar do 2º Pavimento (x = 1 a 17)
SFAT.x	Estado dos sensores de fluxo de ar do Térreo (x = 1 a 22)
SN1.x	Estado dos Sensores de nível do 1º Pavimento (x = 1 a 10)
SN2.x	Estado dos Sensores de nível do 2º Pavimento (x = 1 a 17)
SNT.x	Estado dos Sensores nível do Térreo (x = 1 a 22)
SP1	Estado do sensor de pressão nos dutos no 1º Pavimento
SP1.x	Estado dos Sensores de presença do 1º Pavimento (x = 1 a 9)
SP2	Estado do sensor de pressão nos dutos no 2º Pavimento
SP2.x	Estado dos Sensores de presença do 2º Pavimento (x = 1 a 14)
SPT	Estado do sensor de pressão nos dutos no Térreo
SPT.x	Estado dos Sensores de presença do Térreo (x = 1 a 17)
ST1.x	Estado dos Sensores de Temperatura internos do 1º pavimento (x = 1 a 9)
ST2.x	Estado dos Sensores de Temperatura do 2º pavimento (x = 1 a 14)
STE1.x	Estado dos Sensores de Temperatura externos do 1º pavimento (x = 1 a 4)
STT.x	Estado dos Sensores de Temperatura do térreo (x = 1 a 17)
SU1.x	Estado dos Sensores de Umidade do 1º Pavimento (x = 1 a 9)
SU2.x	Estado dos Sensores de Umidade do 2º Pavimento (x = 1 a 14)
SUT.x	Estado dos Sensores de Umidade do Térreo (x = 1 a 17)
TEC	Estado do sensor de temperatura da água na chegada dos Chillers
TIFC	Temperatura inferior de free cooling
TSA1.x	Temperatura de setpoint Ambiente para um ambiente x no 1º pavimento

TSA2.x	Temperatura de setpoint Ambiente para um ambiente x no 2º pavimento
TSAT.x	Temperatura de setpoint Ambiente para um ambiente x no térreo
TSC1	Estado do sensor de temperatura da água na saída do Chiller1
TSC2	Estado do sensor de temperatura da água na saída do Chiller2
TSD1.x	Temperatura de setpoint de desocupação para um ambiente x no 1º pavimento
TSD2.x	Temperatura de setpoint de desocupação para um ambiente x no 2º pavimento
TSDT.x	Temperatura de setpoint de desocupação para um ambiente x no Térreo
TSF1	Temperatura de setpoint fria do chiller 1
TSF2	Temperatura de setpoint fria do chiller 2
TSFC	Temperatura superior de free cooling
TSP1	Temperatura de setpoint do 1º pavimento para controle das válvulas
TSP2	Temperatura de setpoint do 2º pavimento para controle das válvulas
TSQ	Temperatura de setpoint quente dos dois chillers
TST	Temperatura de setpoint do térreo para controle das válvulas
URMAXN	Umidade relativa de setpoint máxima
URMIN	Umidade relativa de setpoint mínima
V1	Controle da válvula do fan-coil no 1º pavimento
V2	Controle da válvula do fan-coil no 2º pavimento
VENT1	Controle do Ventilador do fan-coil no 1º Pavimento
VENT2	Controle do Ventilador do fan-coil no 2º Pavimento
VENTT	Controle do Ventilador do fan-coil no térreo
VR1.x	Abre/Fecha válvulas para reservatórios do 1º Pavimento (x = 1 a 10)
VR2.x	Abre/Fecha válvulas para reservatórios do 2º Pavimento (x = 1 a 17)
VRT.x	Abre/Fecha válvulas para reservatórios do Térreo (x = 1 a 22)
VT	Controle da válvula do fan-coil no térreo

OBS: Para todo este trabalho, em qualquer uma das abreviaturas anterior, a letra X (caixa alta) representa um pavimento e a letra x (caixa baixa) representa um ambiente. Por exemplo, a abreviatura SPX.x significa sensor de presença no ambiente x do pavimento X.

1 INTRODUÇÃO.

1.1 n-ZEB – NET ZERO ENERGY BUILDING

O conceito n-ZEB surgiu entre 2008 e 2012 quando pesquisadores de diversos países do mundo trabalharam juntos para desenvolver o programa de pesquisas “Rumo a edifícios solares com gasto energético nulo” (“Towards Net Zero Energy Solar Buildings”), visando trazer esse o conceito para o mercado.

O conceito se refere a edifícios que possuem gasto energético nulo ou próximo de nulo. “[...] um edifício n-ZEB é definido como um edifício que tem um desempenho energético muito alto [...] A demanda energética próxima de zero ou baixa demanda energética requerida deve provir principalmente de fontes renováveis.” (Kurnitski *et al*, 2011). Portanto, um edifício n-ZEB deve ser autossuficiente energeticamente, ou pelo menos ter um alto nível de autossuficiência energética com esta energia provinda de fontes renováveis. A Figura 1.1 ilustra a base do consumo ideal (nulo) de um edifício n-ZEB.

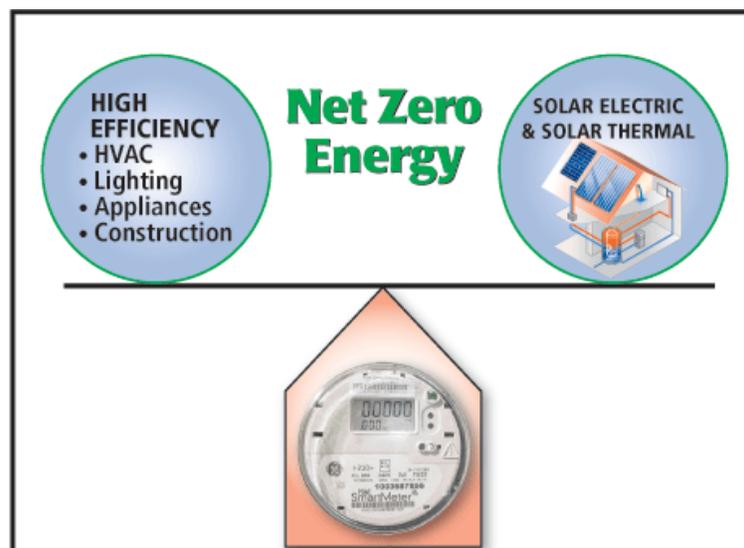


Figura 1.1 representação do consumo ideal de um edifício n-ZEB (Sweagon Air Academy, 2012)

O objetivo do programa de pesquisas é desenvolver um entendimento comum, ou seja, uma estrutura internacional harmoniosa, criar ferramentas de processos e criar soluções tecnológicas avançadas e orientações industriais para o conceito n-ZEB. A ideia engloba prédios novos ou já existentes localizados nas zonas climáticas dos países participantes.

A estratégia, para os edifícios n-ZEB, é o uso de materiais sustentáveis e da geração de energia elétrica no próprio local, além de utilizar as próprias condições climáticas para criar soluções adaptáveis ao edifício. Espaços bem dimensionados, limpos e funcionais, juntamente com uma construção eficiente se torna a base sólida para um projeto n-ZEB. Com o auxílio de ferramentas matemáticas como cálculo de carga térmica e o dimensionamento de equipamentos de climatização (HVAC) aliados à análise de custos, é possível aperfeiçoar a eficiência energética aos níveis desejados.

Portanto, a forma mais fácil para colocar a estratégia em prática é criar um edifício com gasto energético nulo desde o seu projeto. É com este intuito que a Universidade de Brasília está propondo a construção de um edifício n-ZEB na instituição.

A magnitude do projeto não está apenas em seu caráter inovador no país, mas também na interdisciplinaridade que este demanda para sua concretização. Por isso estudantes de vários cursos formaram um grupo para projetar e, futuramente desenvolver este edifício nos terrenos da universidade.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho faz parte do desenvolvimento do projeto do edifício n-ZEB na Universidade de Brasília. O principal objetivo aqui proposto é desenvolver o projeto de controle e automação do sistema de climatização para o edifício n-ZEB através de estratégias elaboradas para, desta forma, obter-se o menor gasto energético possível com máxima eficiência na climatização. Com uso de sensores e atuadores específicos e baseando-se nas pesquisas desenvolvidas e apresentadas no trabalho de Teixeira (2015), que propôs um sistema híbrido para o edifício, será feito uso dos equipamentos, aliados às condições climáticas externas, que podem ser favoráveis ao processo de climatização. A figura 1.2 ilustra a atual proposta para o layout do edifício n-ZEB na UnB.

Juntamente a este objetivo principal pretende-se também:

1. Explicar o funcionamento do sistema híbrido de climatização proposto por Teixeira (2015) para que seja possível desenvolver o projeto de controle. O sistema híbrido é composto por três sistemas:
 - Resfriamento por expansão indireta com *chiller* de condensação a ar
 - Sistema de Volume de ar Variável
 - Sistema de resfriamento evaporativo direto

2. Explicar como será implementado o sistema de controle para os três sistemas de climatização expostos no item 1.
3. Desenvolver estratégias específicas para aperfeiçoar o controle dos sistemas de climatização.
4. Desenvolver estratégias para segurança automática e manual para o sistema de controle.
5. Desenvolver a lógica para o controle do sistema de climatização.
6. Apresentar a lógica desenvolvida em fluxogramas para facilitar a interpretação da programação que deverá ser feita, e o entendimento do controle completo do sistema híbrido de climatização.



Figura 1.2 Modelo tridimensional proposto pela FAU, atualizado. (Teixeira, 2015)

1.3 METODOLOGIA E ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é dividido em sete capítulos sendo o primeiro deles esta introdução.

Os três capítulos subsequentes têm o intuito de apresentar os sistemas de climatização, bem como das principais estratégias de controle que serão utilizadas no edifício.

O capítulo 2 (Sistema de Climatização Por Expansão Indireta com *Chiller* de Condensação a Ar) tem início explicando o que é um sistema resfriamento e os principais tipos de sistemas existentes. Em seguida é explicado o que é um sistema de resfriamento por expansão indireta com *Chiller* a ar e por fim são apresentadas as estratégias que serão utilizadas no desenvolvimento do projeto.

A estrutura do capítulo 3 (Sistema de Volume de Ar Variável) é muito similar a do capítulo 2. É apresentado conceito de climatização com volume de ar variável seguido pelas estratégias de controle que serão usadas para o projeto deste sistema.

O Capítulo 4 (Sistema de Resfriamento Evaporativo Direto) também segue o padrão dos dois anteriores, contudo neste é tratado o sistema de resfriamento evaporativo direto e as estratégias de controle que serão utilizadas.

Os capítulos 2, 3 e 4 devem ser vistos como a base para o entendimento do projeto que será apresentado em seguida. Neles já é sugerida a implementação conjunta do projeto de controle para que todos os sistema funcionem simultaneamente de forma a alcançar a máxima eficiência. Além disso, são apresentados os principais sensores e atuadores e seu funcionamento para que tudo funcione como pretendido. Esses três capítulos são essenciais para o entendimento da proposta de controle e automação do sistema proposto no Capítulo 5.

O capítulo 5 (O Sistema de Controle) irá apresentar o detalhamento completo das estratégias de controle que serão utilizadas. No início do capítulo, será apresentado o funcionamento de um fluxograma e como serão feitos os fluxogramas para este projeto. Em seguida, serão apresentadas as estratégias de controle específicas para cada um dos principais sistemas. Para isso, serão expostos três tópicos principais, cada um destinado para um dos sistemas apresentados nos capítulos 1, 2 e 3. Todos estes tópicos têm sub tópicos, onde serão explicados os sistemas de controle de cada equipamento ou conjunto de equipamentos do respectivo sistema de climatização. A primeira parte dos sub tópicos explica o funcionamento do sistema de controle. A segunda parte explica como funcionará o sistema de segurança para aqueles equipamentos, e a terceira parte apresenta os fluxogramas de representação para aquele sistema de controle.

A representação em fluxogramas facilita a compreensão do sistema de controle, considerado neste trabalho como um importante recurso para um melhor entendimento do sistema. Eles constituem-se em instrumentos gráficos úteis para a apresentação dos resultados de tudo que foi explicado até sua apresentação. Muitos dos processos e decisões utilizados nos fluxogramas são apresentados como abreviações, e os significados destas abreviações podem ser encontrados na lista de símbolos no início do trabalho ou na lista de pontos apresentada no Apêndice II (coluna: TAGS) para melhor entendimento dos fluxogramas. É sugerido que a lista de pontos seja utilizada para fazer a interpretação dos fluxogramas. Também para melhor entendimento do capítulo 5, são apresentados nos Apêndices III a VIII,

os quantitativos de sensores e atuadores e as plantas baixas dos três pavimentos com as sugestões de posicionamento dos sensores nos ambientes.

Caso a visualização de algum dos documentos nos Apêndices seja dificultada devido ao tamanho das fontes (pequenas devido à impossibilidade de adaptação em folha A4), é aconselhado sejam visualizados utilizando os documentos digitalizados (no formato PPTX e DWG) que são apresentados junto a este trabalho.

No Capítulo 6 é apresentada a conclusão do projeto e o que será possível alcançar caso seja implementado quando o edifício n-ZEB for construído.

Por fim, o Capítulo 7 expõe as referências bibliográficas utilizadas.

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para se desenvolver projetos para sistemas de climatização é muito importante conhecer os diferentes tipos de sistemas que podem ser usados. Ferraz (2012) expõe diversos sistemas de climatização e suas aplicações. Divide os sistemas quanto a capacidade, quanto a utilização e quanto a classificação técnica para, então, explicar cada sistema de forma individual e objetiva.

Aliado ao tema da publicação de Ferraz, Ferreira (2015) destaca a diferença entre sistemas de expansão direta e indireta. Esta comparação é pertinente ao presente trabalho diante do fato que é usado um sistema indireto (com *chillers*) e um sistema direto (com resfriamento evaporativo)

Em seu trabalho, Johnson (2009) apresenta o funcionamento dos *chillers* de condensação a ar, bem como seus principais componentes (Compressores, válvulas de expansão, condensadores e evaporadores). Com esquemas representativos e gráficos são utilizados os conceitos de entalpia e transferência de calor e massa para explicar como esses equipamentos refrigeram o líquido refrigerante através da troca de calor com o ar.

Na mesma linha de apresentação do funcionamento de *chillers*, através de um estudo de casos real em São Paulo, Corrêa (2012) compara o funcionamento de *chillers* de condensação a ar e condensação a água. Como conclusão, o autor confirma que “a economia de energia com sistema de condensação a água é mínima em relação ao sistema de condensação a ar, e não paga os custos relativos ao pagamento à concessionária pela água de reposição das torres de arrefecimento” (Corrêa, 2012). Desta forma, o autor acaba confirmando o proposto por

Teixeira (2015) em seu trabalho, onde o uso do *chiller* de condensação a ar se mostra mais eficiente que o a água quando analisadas todas as variáveis de gastos.

Para que se possa desenvolver um controle eficiente para um sistema de VAV, é importante entender e escolher estratégias que aumentem a eficiência e diminuam os gastos do sistema. Murphy (2015) apresentou algumas estratégias para sistemas de VAV de alta performance. Algumas delas, como ligamento e desligamento ótimos, otimização da ventilação e identificação das “Rogue Zones” serão apresentadas com mais detalhes nos capítulos seguintes. Estas estratégias podem ser implementadas em qualquer sistema de VAV, e baseado em normas e livros renomados, Murphy explica como utiliza-las de forma apropriada de forma a alcançar resultados eficientes com um sistema de Volume de Ar Variável bem projetado e bem controlado.

Ainda no tema sistemas de VAV, Zhao (2011) explica como a unidade terminal (ou caixa de VAV) deve funcionar para que todo o sistema opere corretamente. Utilizando alguns sensores e atuadores como sensor de fluxo de ar, sensor de pressão e *dampers* de passagem de ar, Zhao apresenta os conceitos e ideias para que o controle seja realizado através de uma ou mais PLCs (programadoras lógicas controláveis). As ideias mais abordadas por Zhao (2011) são: “economia de energia; melhor qualidade de controle; longa vida útil para os atuadores, estabilidade no controle durante a mudança de *setpoint*”. Grande parte destas ideias foram utilizadas no capítulo 5 durante a apresentação da lógica do sistema de controle através dos fluxogramas.

Inicialmente em seu trabalho, Dunkleberger *et al* (2015) descreve o que é e como funciona um sistema de Volume de Ar Variável. Em seguida são apresentados os componentes de uma caixa de VAV, baseados na explicação anterior dos autores. São apresentadas então as vantagens e desvantagens em se utilizar este tipo de sistema, de forma que é deixado ao leitor a decisão de usa-lo ou não. Por fim são apresentados alguns parâmetros numéricos que são de fundamental importância quando se dimensiona um sistema de VAV. Mesmo não tendo apresentado informações sobre sistemas de controle, o trabalho é muito útil para se entender o funcionamento e a lógica necessária para a operação de um sistema de VAV completo, e por isso foi utilizado para que a lógica de controle ficasse de acordo com um sistema real.

Desenvolver um projeto de controle para um sistema de volume de ar variável completo é um trabalho que exige conhecimentos em diversas áreas. Para se atingir máximo desempenho com mínimo gasto energético, é preciso ter conhecimento de carga térmica, dimensionamento de dutos, velocidade de fluxo de ar, pressão interna, viscosidade de materiais dentre outras

variáveis. Pereira *et al* (2015) apresenta estas e outras variáveis que servem como base para se projetar um bom sistema de controle. Apesar de o trabalho em questão se basear no uso de um tipo específico de controladora, os conceitos nele empregados podem ser generalizados para qualquer tipo de equipamento. Assim, o trabalho de Pereira *et al* (2015) foi utilizado também como base para o desenvolvimento do projeto de controle do sistema de VAV do edifício n-ZEB.

O sistema de resfriamento evaporativo vem sendo amplamente utilizado em diversos países do mundo. Em seu projeto, Kinney (2004) apresentou estudos referentes a esse tipo de sistema nos Estados Unidos. Apresenta conceitos para o funcionamento do sistema como: temperatura de bulbo úmido e seco; tipos e o funcionamento de resfriadores evaporativos; os tipos de instalações possíveis; possíveis problemas que podem ocorrer, como o gasto excessivo de água. Com estes conceitos Kinney utiliza dados de seu país para apresentar soluções ótimas para a utilização deste tipo de sistema. Os estudos de Kinney foram muito utilizados no capítulo 4 para que fossem obtidas as melhores soluções para este sistema no edifício.

De forma muito semelhante ao trabalho de Kinney, Camargo (2004) apresentou soluções para sistemas de VAV voltado ao conforto térmico humano com gastos reduzidos. Contudo, desta vez foram utilizados dados de cidades brasileiras, o que se aproxima mais com a realidade do edifício n-ZEB.

Já em seu outro trabalho, Camargo (2003) apresentou o conceito de resfriamento evaporativo como opção para poupar energia e o meio ambiente. Outro fator apresentado que foi muito importante para o desenvolvimento do presente projeto, foram os conceitos de sistemas híbridos para diminuir o consumo de energia. Além disso, também apresentou conceitos e sugestões para o uso do sistema direto ou indireto. As ideias e informações passadas por Camargo em seus dois trabalhos foram muito utilizadas nos capítulos 4 e 5, tanto no desenvolvimento do projeto para o sistema de resfriamento evaporativo em conjunto com os outros dois sistemas no capítulo 4, quanto para a apresentação do projeto no capítulo 5.

A apresentação da teoria de PID voltada para a instrumentação feita por Matias (2002) é muito útil para o entendimento dos princípios de funcionamento de um controlador PID. Foram apresentados conceitos do controle proporcional, do controle integral e do controle derivativo, e no final Matias expos um exemplo de aplicação do funcionamento de um controlador PID. Mesmo não sendo foco deste projeto, os controladores são de fundamental importância em um

sistema de controle, e as informações apresentadas por Matias foram muito utilizadas para algumas explicações realizadas neste projeto.

De forma muito mais aprofundada e detalhada, Ogata (1995) apresenta em seu livro informações sobre sistemas de controle discretos baseados em teorias e cálculos matemáticos robustos para o desenvolvimento de sistemas de controle. O trabalho de Ogata é considerado referência mundial em cursos de controle e automação, e foi utilizado como base para o desenvolvimento deste projeto. Mesmo não tendo sido desenvolvido nenhum tipo de cálculo robusto, todas as estratégias apresentadas nos capítulos subsequentes são fundamentadas no trabalho feito por Ogata para que seja possível implementar o sistema real no futuro.

Dietrich *et al* (2010) expuseram conceitos de automação predial computacional. Foram apresentados conceitos e representações em fluxogramas que auxiliam no entendimento de como deve funcionar um sistema de controle integrado entre si e integrado com outras redes (inclusive a internet). Alguns conceitos, como a supervisão energética e informações de segurança, foram de fundamental importância para este projeto, especialmente no capítulo 5 onde foi apresentado o controle e segurança dos equipamentos de climatização de cada sistema apresentado nos capítulos 2, 3, e 4.

Ainda no campo do controle de sistemas de climatização, Lifrieri (2015) expõe também o funcionamento deste tipo de sistema, os parâmetros controlados e os requerimentos do sistema. Em seguida explica, com detalhes, o que é o controle para sistemas de ar condicionado e aquecimento (HVAC – Heating, Ventilating and Air Conditioning). Por fim apresenta os tipos de controladores que podem ser utilizados e sua integração com diversos sensores e atuadores.

Tendo como base os conceitos apresentados nas bibliografias acima, foi necessário o estudo dos fluxogramas para apresentação dos sistemas de forma clara e objetiva. Para isto, utilizou-se as informações transmitidas nos trabalhos de Faria (2015), onde são explicados os principais conceitos de um fluxograma para sua utilização com diversos campos.

Desta forma, as revisões bibliográficas apresentadas demonstram a existência de várias estratégias e soluções de controle para os três sistemas que serão utilizados no edifício n-ZEB.

2 SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO POR EXPANSÃO INDIRETA COM *CHILLER* DE CONDENSAÇÃO A AR

Este capítulo se propõe à exposição das características e detalhes de um sistema de climatização por expansão indireta com *chillers* de condensação a ar para a implementação do controle deste sistema no edifício n-ZEB. Serão apresentados também alguns outros sistemas com características básicas para justificativa da escolha do sistema por expansão indireta para o edifício.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO CONFORME O TIPO DE EQUIPAMENTO UTILIZADO

Os sistemas de climatização de ar condicionado se classificam em dois grupos de acordo com o tipo de equipamento utilizado: expansão direta e expansão indireta.

2.1.1 Expansão direta

Nesta classificação, o fluido de refrigeração se expande em contato com o ar a ser esfriado (processo de evaporação do fluido refrigerante) no interior da serpentina evaporadora, que absorve o calor do fluxo de ar promovendo assim o resfriamento.

Como o ar entra em contato direto com o fluido refrigerante, este sistema é conhecido como expansão direta. A expansão direta é muito utilizada em sistemas de pequeno e médio porte onde não há necessidade do resfriamento de grandes edifícios ou necessidade de um sistema robusto de controle.

2.1.2 Expansão indireta (água gelada)

Neste tipo de sistema, ao contrário da expansão direta, o ar não entra em contato direto com o fluido refrigerante. Para isto, são usadas unidades de produção de água gelada, os *chillers*. Depois de refrigerada, a água circula por um sistema de dutos até chegar aos *fan-coils*, que são serpentinas ventiladas por onde passa a água gelada. Com esta passagem o ar troca calor com a água gelada e se resfria, gerando a climatização do ambiente.

Este tipo de sistema é muito utilizado com sistemas de Volume de Ar Variável (que será discutido posteriormente, no capítulo...).

Devido ao alto grau de robustez de controle envolvido no processo, ao baixo gasto energético e a alta capacidade de resfriamento deste sistema, Teixeira (2015) em seu trabalho escolheu, após vários cálculos e testes de simulação, um sistema de expansão indireta com chillers com condensação a ar.

2.2 UM BREVE RESUMO A RESPEITO DOS SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO MAIS CONHECIDOS NA ATUALIDADE

Nos dias atuais, é muito difícil encontrarmos um edifício de médio ou grande porte sem um sistema central de climatização. Isto ocorre devido às exigências de conforto e melhores condições de trabalho que têm aumentado consideravelmente em todo o mundo. De fato, a ASHRAE tem criado diversas normas para garantir que o conforto térmico em ambientes fechados seja atingido de forma apropriada. Dois exemplos destas normas são a ANSI/ASHRAE Standard 62.1 (*Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*) e a ANSI/ASHRAE Standard 55 (*Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*)

Estas normas garantem que o ambiente interno será ventilado apropriadamente (Norma 62.1) e que o ambiente terá condições climáticas, como temperatura e umidade, que gerem conforto térmico satisfatório para seres humanos.

Existem diversos tipos de sistema de climatização voltados para todos os tipos de edifícios. Estes sistemas são chamados de HVAC (Heating Ventilating and Air conditioning), ou seja, Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado. Para a aplicação deste projeto no edifício n-ZEB, o sistema será de resfriamento, já que não há necessidade de aquecimento interno em nenhuma época do ano no Distrito Federal. Portanto, neste item, são apresentados os tipos de ar condicionado mais conhecidos na atualidade.

2.2.1 Condicionadores de ar de janela

Este tipo de sistema, como o próprio nome já diz, é instalado em janelas e paredes. Como sua capacidade de resfriamento é baixa (entre 0,5 a 3,0 TR), são utilizados em ambientes de pequeno porte como salas individuais ou residências. Um exemplo de sistema de condicionador de ar de janela é mostrado na Fig 2.1.

Caso seja necessário, estes condicionadores podem trabalhar como aquecedores nos períodos de inverno. Para isto, o condensador opera como evaporador, de forma a funcionar como bomba de calor para gerar aquecimento.

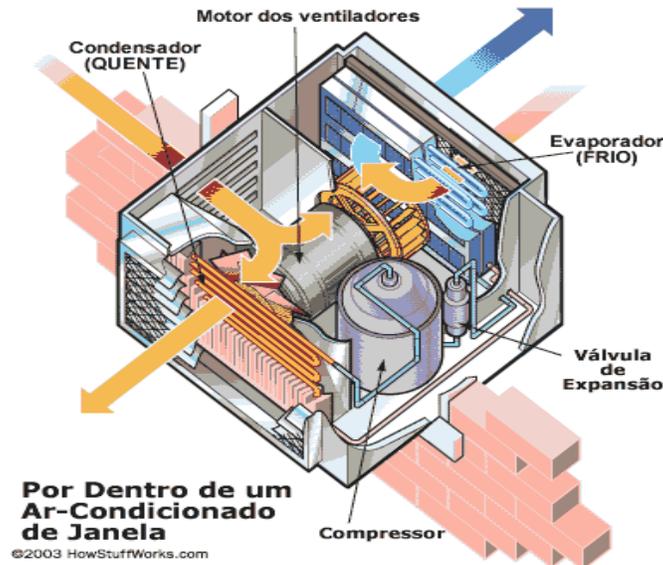


Figura 2.1 Esquema interno de um condicionador de ar de janela. (Howstuffworks, 2013)

Algumas vantagens destes sistemas é que eles são compactos, de fácil manutenção, não ocupam espaço interno e podem funcionar como aquecedores. Entretanto, sua capacidade de resfriamento é baixa, não possuem flexibilidade para projetos de controle, geram um alto custo energético caso sejam utilizados para grandes escalas e, além disso, alteram as características arquitetônicas da fachada externa do edifício.

Por ser de capacidade muito baixa, não haver possibilidade de integração do controle e por gerar grandes gastos de energia quando utilizados para resfriar diversos ambientes, este tipo de condicionador não é o ideal para uso em um edifício como o n-ZEB (sem gastos energéticos que não sejam produzidos pelo próprio edifício).

2.2.2 Condicionadores *self-contained*

Os condicionadores tipo *Self-contained* são sistemas de médio porte (entre 5 e 30 TR) utilizados em residências ou comércios. Podem atender lojas, restaurantes, bancos, grandes residências ou pequenos prédios residenciais. O sistema pode ser com condensação a água ou a ar.

O sistema com condensação a ar acoplado utiliza um ventilador centrífugo que circula o ar nas aletas do condensador absorvendo o calor do fluido de refrigeração. Este líquido condensa (passa do estado de vapor para o líquido) dentro do condensador ao fornecer calor ao ar aquecendo-o. Em seguida é transportado para o evaporador através de dutos. No evaporador, o líquido refrigerante é passado novamente para o estado gasoso absorvendo calor do ar que será transmitido ao ambiente (agora frio). Um exemplo de condicionador tipo *self-contained* com condensação a ar é mostrado na Fig 1.2.

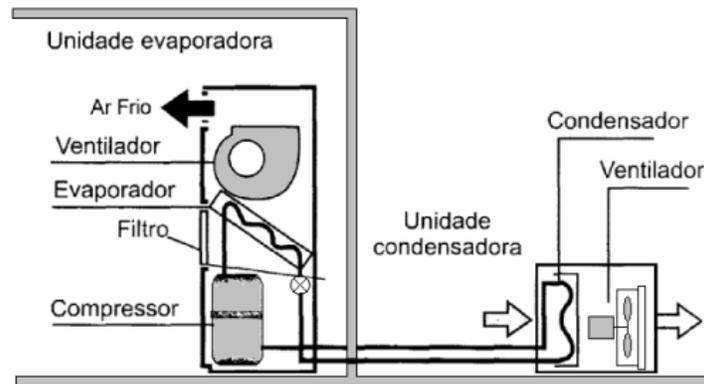


Figura 2.2 Condicionador *self-contained* com condensação a ar Ferraz (2012)

Estes condicionadores podem ser instalados dentro do recinto que será climatizado ou em ambientes separados (como casa de máquinas), havendo, desta forma, um sistema de dutos de cobre devidamente isolado para que haja a circulação do líquido refrigerante. É importante que o condensador não seja instalado no interior do ambiente, pois como explicado anteriormente, este equipamento aquece o ar devido à troca de calor com o líquido refrigerante (o ar absorve o calor para a condensação do líquido) para sua condensação.

Já o sistema com condensação a água necessita de uma torre de arrefecimento de água para seu funcionamento. Neste caso, a água quente sai do condensador até a torre de resfriamento, onde o calor é liberado e a água fria pode ser usada novamente no condensador. O restante do processo é bastante similar ao sistema com condensação a ar.

Algumas vantagens deste sistema são sua grande facilidade de instalação, baixa manutenção, menor gasto energético que o ar condicionado de janela e a grande versatilidade para projetos.

Por sua capacidade ser baixa e devido à baixa robustez para um controle eficiente, este sistema não será utilizado no sistema n-ZEB.

2.2.3 Condicionadores tipo *splits*

Estes sistemas são bastante utilizados por sua condição estética e seu baixo nível de ruído, já que o compressor fica fora do ambiente resfriado. Pode ser instalado junto ao piso, ao teto ou até mesmo sobre o forro. É muito utilizado em ambientes que não foram previamente projetados para haver um sistema central de ar condicionado (como prédios antigos).

A conexão entre o evaporador e o condensador é feita via tubulação de cobre. Um único condensador pode atender a diversos evaporadores, sendo que os sistemas grandes (com até 64 evaporadores conectados a unidade condensadora) são chamados de sistemas VRV. Assim como nos exemplos anteriores, o condensador libera calor, e por isso não pode ser instalado dentro do ambiente climatizado.

Na Fig 2.3 é mostrado um exemplo deste tipo de sistema em que são utilizados três unidades evaporadoras em um único condensador.



Figura 2.3 Condicionador tipo *splits*. (WebArCondicionados, 2013)

Algumas vantagens deste equipamento são seu baixo custo, baixo nível de ruído, facilidade de instalação, possibilidade de relocação dos equipamentos e não ser necessário utilizar sistemas de água gelada e redes complexas de dutos.

Devido a sua impossibilidade de ser controlado com precisão e ao gasto energético relativamente alto, este equipamento não é ideal para o edifício n-ZEB.

2.2.4 Condicionadores tipo *fan-coil/Chiller*

É um sistema por expansão indireta muito utilizado em prédios comerciais de grande porte, fábricas, hotéis e grandes galpões. O custo inicial do sistema é alto, e há necessidade de manutenção preventiva regular. Contudo, o sistema é muito eficiente e pode ser completamente controlado quando acoplado a um sistema de VAV (que será explicado

detalhadamente nos próximos capítulos). Além disso, o gasto energético é muito baixo quando comparado aos outros sistemas descritos anteriormente.

Basicamente, neste sistema, os *chillers* (unidades de refrigeração de água), resfriam a água que será transmitida por bombas através de dutos espalhados por todo um edifício até as unidades *fan-coil*. A água gelada circula através destas serpentinas e resfria o ar que é lançado para o ambiente por um ventilador (daí o nome *fan-coil*). As bombas de circulação de água, válvulas de fluxo, os *fan-coils* e os *chillers* devem possuir um sistema de controle integrado para seu funcionamento.

Teixeira (2015) escolheu este tipo de sistema para o edifício n-ZEB. Por isso, os tópicos 1.3 e 1.4 serão totalmente dedicados para a exposição deste sistema, de seus componentes e de como será feito seu controle.

2.3 CHILLER COM CONDENSAÇÃO A AR COMO MODELO ADOTADO NO EDIFÍCIO OBJETO DO ESTUDO

Como descrito anteriormente, um sistema de climatização por expansão indireta resfria o ar sem que este entre em contato com o fluido refrigerante. Neste caso, utiliza-se água gelada que circula por dutos previamente planejados. Para resfriar a água, são utilizados os equipamentos denominados *chillers*. Os *chillers* podem ser de dois tipos: De condensação a água e de condensação a ar.

2.3.1 Conceituação de *chiller*

Um *chiller* é um equipamento que tem a função de arrefecer (resfriar) a água ou algum outro líquido. Para que este resfriamento se realize, a água percorre um ciclo termodinâmico, tendendo a perder calor até resfriar a uma temperatura predeterminada.

Estes equipamentos, devido a sua alta capacidade de resfriamento e relativamente baixo gasto energético, são utilizados em locais com grande movimentação de pessoas diariamente. Algumas possíveis aplicações são prédios comerciais, aeroportos além de diversos tipos de indústrias.

Os *chillers* funcionam juntos com equipamentos chamados *fan-coil*. A água resfriada pelo *chiller* é bombeada para um sistema de dutos e percorre um determinado caminho até chegar aos *fan-coil*. Estes sistemas são compostos por uma serpentina por onde a água passa e um

ventilador, que joga o ar por entre a serpentina para que seja resfriado. Como os *fan-coils* farão parte do sistema de expansão indireta com chiller com condensação a ar, mais detalhes sobre este equipamento será descrito posteriormente.

Por ser um sistema complexo e exigir um controle bastante robusto, para que funcione adequadamente é necessário que se façam manutenções periódicas para prevenir qualquer falha. Existem dois tipos de manutenções: as corretivas e as preventivas. As corretivas servem para reparar danos que ocorreram e corrige o mau funcionamento. As preventivas evita a incidência de avarias durante o uso dos equipamentos.

Existem algumas peças que necessitam de mais cuidado quanto à manutenção preventiva. Os filtros, aletas, motores, bombas e as serpentinas são peças que precisam ser trocadas, limpas e reajustadas para que o sistema não pare de funcionar ou funcione de forma errada aumentando o gasto energético.

No edifício n-ZEB, como serão utilizados *chillers* de condensação a ar, é necessário que se tenha um plano de manutenção para garantir a eficiência do sistema. Este plano de manutenção não é parte deste projeto, e foi citado aqui apenas como informativo para inteirar o leitor quanto às necessidades que este projeto irá acarretar.

A Figura 2.4 mostra um exemplo de *chiller* real, no caso um *chiller* de resfriamento com condensação a ar.



Figura 2.4 *Chiller* de resfriamento com condensação a ar (A geradora, 2015)

Tendo em mente o funcionamento básico de um sistema com *chillers* e a necessidade de realizar manutenção, será exposto a seguir um comparativo entre dois tipos de *chillers* bem como uma explicação sobre seu funcionamento.

2.3.2 Estudo comparativo *chiller* com condensação a água x ar

Um grande dilema em projetos de climatização sempre foi qual o melhor tipo de equipamento a ser utilizado em cada situação. Apesar de *chillers* com condensação a água terem custo inferior aos com condensação a ar, a instalação completa do sistema normalmente é mais cara devido à necessidade de infraestrutura para a água de condensação, torres de arrefecimento e bombas de água de condensação.

Além disso, o consumo de energia elétrica em sistemas com condensação a ar tem sido mais baixo desde que se passou a utilizar condensadores a ar mais eficientes. Desta forma, após suas análises, simulações e cálculos, Teixeira (2015) optou pela escolha deste tipo de *chiller* para o edifício n-ZEB, garantindo assim maior economia de energia, diminuição de gastos e possibilitando uma capacidade semelhante de resfriamento.

De forma sucinta, no *chiller* de condensação a água existe um condensador onde o fluido refrigerante passa do estado gasoso para o líquido. Para mudar de fase, o fluido fornece calor para a água, que circula por um sistema de dutos apropriado. Esta água é levada para uma torre de arrefecimento onde será resfriada para reutilização, e o fluido refrigerante irá circular até o evaporador para passar do estado líquido para o gasoso absorvendo calor da água. Esta água que esfriou (perdeu calor) será então enviada para os *fan-coils* para resfriar o ar do ambiente. Como não se propõe utilizar este tipo de equipamento para o edifício n-ZEB, este sistema não será explicado detalhadamente, e deixa-se ao leitor a iniciativa de estudá-lo caso seja de seu interesse.

A seguir será apresentado o funcionamento de um sistema com *chiller* com condensação a água e ar, tendo como foco os equipamentos a serem controlados.

2.3.3 Componentes de um *chiller* com condensação a ar

Os *chillers* com condensação a ar são compostos por quatro componentes principais para seu funcionamento (além de diversos outros periféricos): condensador, evaporador, compressor e válvula de expansão. A figura 2.5 mostra como funciona um sistema básico de *chiller* com condensação a ar.

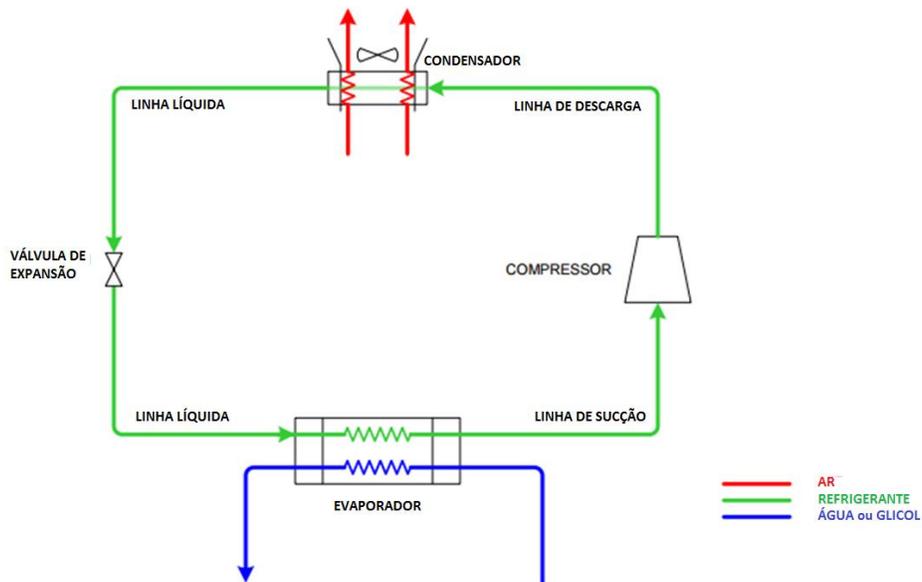


Figura 2.5 Funcionamento básico de um *chiller* com condensação a ar. (Johnson, 2009)

Apesar de Teixeira (2015) não ter previsto, poder-se-ia utilizar um *chiller* com um sistema de condensação híbrido a ar e a água. Nesta situação a água servida do edifício seria aproveitada para atuar no lugar do ar no processo de condensação. Isto reduziria significativamente a emissão de ar quente para o ambiente externo e não acrescentaria gastos energéticos sobressalentes ao processo. Não será utilizado este tipo de sistema por não ser esta a função deste projeto, contudo deixaremos a ideia como sugestão a ser implantada futuramente.

O processo de funcionamento do *chiller* de condensação a ar depende do entendimento de vários outros conhecimentos como termodinâmica, transferência de calor e transferência de massa. Assim, serão dispensados detalhes sobre o como funciona o processo de resfriamento para darmos mais atenção ao processo de controle do sistema. Será suficiente entender a função de cada um dos componentes do *chiller* para o processo de resfriamento.

2.3.3.1 Compressor

O objetivo do compressor é circular o líquido refrigerante de forma a realizar o ciclo de compressão de refrigeração. Em um único *chiller* pode haver um ou vários compressores. A ativação de cada compressor de um determinado *chiller* determina a capacidade de

resfriamento deste *chiller*. Portanto, quanto mais compressores houver, maior o controle de potência do equipamento.

2.3.3.2 Condensador

O condensador, como o próprio nome já diz, passa o líquido refrigerante da fase gasosa para a fase líquida. Com esta mudança de fase, o calor liberado é transmitido para o ar que passa na serpentina presente neste equipamento e se aquece. Como há liberação de ar quente, é de suma importância que os condensadores sejam instalados fora do ambiente a ser refrigerado para não causarem aquecimento do ar que se deseja resfriar.

2.3.3.3 Válvula de expansão

O propósito desta válvula é reduzir a pressão do líquido refrigerante para que, ao chegar ao evaporador, este passe da fase líquida para a gasosa. Além disso, esta válvula regula o fluxo de líquido refrigerante e mantém o equilíbrio entre a quantidade de líquido no condensador, evaporador e compressor.

2.3.3.4 Evaporador

Assim como o condensador, o próprio nome do evaporador já sugere sua função. Entretanto, diferente do condensador, com a passagem do líquido refrigerante do estado líquido para o gasoso neste equipamento, o calor utilizado para esta evaporação é absorvido da água e não do ar. Assim, a água que perdeu calor dentro deste equipamento é resfriada e transmitida para os *fan-coils* que irão realizar a troca de calor entre esta água gelada e o ar a ser climatizado, esfriando-o.

2.4 SISTEMA DE ÁGUA GELADA COM *CHILLER* DE CONDENSAÇÃO A AR

O sistema funciona basicamente com a utilização dos *chillers* para resfriar a água que será bombeada por um sistema de dutos até chegar aos *fan-coils*. Em seu trabalho, Teixeira (2015) optou por trabalhar com dois *chillers* da marca *Trane* modelo CGAM52.

Cada um destes *chillers* tem capacidade de 52 TR, e para se atingir a carga térmica do edifício (82TR) será necessário utilizar dois *chillers* deste modelo. Cada um deles possui 4

compressores com capacidade para 13TR, fazendo com que os componentes se liguem em etapas. É importante salientar que o *chiller* deve ser instalado fora da zona climatizada do edifício para que o calor liberado não altere a climatização projetada.

Para ser determinado se a demanda do edifício está maior que a capacidade dos compressores ligados naquele momento, serão usados os sensores de temperatura espalhados pelos ambientes internos (estes sensores serão detalhados posteriormente no sistema de VAV).

2.4.1 *Fan-Coil* como equipamento para a troca de calor

Para que o sistema seja efetivamente climatizado, os *chillers* precisam trabalhar juntamente com os *fan-coils*. A figura 2.6 mostra uma representação esquemática de um *fan-coil*.

O *Fan-coil* é um equipamento que consiste numa serpentina por onde circula água gelada. Acoplado a esta serpentina existe um ventilador que garante que haverá fluxo de ar passando pelo equipamento. Quando o ar passa pela serpentina, ocorre uma troca de calor entre eles, de forma que o ar quente perde calor (se resfria) e a água fria absorve calor (esquenta). Após esta troca, o ar resfriado é jogado ao ambiente para fazer a climatização.

Existem vários tipos de *fan-coils*, alguns deles são: para dutos, *hi-wall*, de piso, de teto, e tipo cassete, entre outros. No caso do edifício n-ZEB, será acoplado um *fan-coil* para dutos em cada pavimento que realizará a refrigeração do ar (como proposto por Teixeira, 2015).

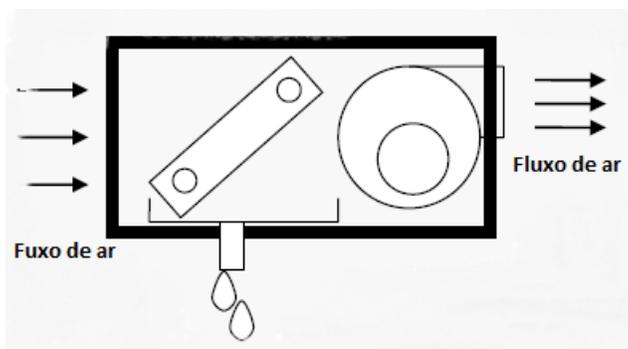


Figura 2.6 Representação de um *fan-coil*. (Lopes, 2011)

Os *fan-coils* devem ser corretamente escolhidos e dimensionados para suprir tanto o sistema de refrigeração com água gelada (dimensionamento das serpentinas) quando o sistema de VAV (dimensionamento dos ventiladores).

Como o objetivo deste trabalho é desenvolver o projeto de controle do sistema de climatização do edifício n-ZEB, supõe-se que este modelamento da capacidade do sistema será feito pelo projetista do próprio sistema.

Deve-se ressaltar que o controle do sistema de climatização é responsável apenas pelas bombas, *chillers* e válvulas que permitem passagem de água para as serpentinas. O controle dos ventiladores dos *fan-coils* faz parte do sistema de VAV (que será visto mais a frente nos próximos capítulos) e não do sistema de climatização por expansão Indireta.

2.4.2 Válvulas de ação proporcional como mecanismo de regulação da passagem de água gelada no sistema

Além dos *fan-coils* e *Chillers*, o sistema deve possuir válvulas de controle para limitar, de acordo com a necessidade, o fluxo de água gelada que chega ao *fan-coil*. Normalmente existe uma válvula para cada *fan-coil* que controla se haverá mais ou menos refrigeração de acordo com a temperatura medida nos sensores dos ambientes e o *setpoint* determinado. Para o edifício n-ZEB será considerado uma válvula por *fan-coil* (como normalmente é feito).

A função da válvula é permitir ou obstruir a passagem de água pelos dutos até a serpentina do *fan-coil*. Desta forma, as válvulas determinam a quantidade de água necessária para atender a demanda térmica do ambiente. Como para dimensioná-las seria necessário desenvolver vários cálculos que fogem do objetivo deste trabalho, não iremos sugerir algum modelo específico. Contudo, vamos supor que as válvulas sejam de ação proporcional, ou seja, abrem e fecham de acordo com a tensão que é alimentada, podendo ficar mais ou menos abertas.

2.4.3 Equipamentos de bombeamento de água para circulação na tubulação

Para que a água seja levada até os *fan-coils*, é necessário que haja uma ou mais bombas para proporcionar a circulação. Contudo, para que não ocorram problemas como canos estourados ou bombas danificadas devido a sobrecargas, o sistema de dutos é projetado para haver uma redundância caso as bombas sejam ligadas e o sistema de válvulas dos *fan-coils*

não esteja aberto em nenhum local. Da mesma forma, o sistema de controle deve garantir que, caso todas as válvulas estejam abertas, uma quantidade suficiente de bombas devem ser acionadas para supri-las.

O dimensionamento das bombas, assim como a quantidade de bombas no edifício não é objetivo deste trabalho, portanto iremos supor que haverá dez bombas para realizar a passagem de água pelos dutos.

Oito destas bombas irão impulsionar a água quente para os *chillers*, são as bombas primárias. Foram sugeridas oito bombas de ação ON/OFF para que cada uma tenha capacidade para fornecer a água que será gelada por cada um dos compressores. Assim, a pesar do custo inicial ser mais alto (por se comprar oito bombas menores em vez de, por exemplo, duas maiores), a economia de energia será muito maior já que poderão ser ligadas menos bombas caso a demanda esteja baixa. Além disso, a possibilidade de revezamento das bombas aumenta a durabilidade do equipamento.

As outras duas bombearão a água gelada até o sistema de *fan-coils*, são chamadas de bombas secundárias. Estas bombas são de ação proporcional, e sua potência é determinada de acordo com a necessidade de resfriamento do sistema.

Para facilitar o entendimento do leitor, supomos que as oito bombas primárias têm a mesma capacidade, sendo esta suficiente para suprir as necessidades dos compressores dos *chillers*, e as duas secundárias tenham também a mesma capacidade, entretanto com velocidade de bombeamento variável (cada uma com metade da capacidade necessária para enviar a água até os *fan-coils* caso todos estejam em uso).

2.4.4 Mecanismos de segurança do sistema: válvulas de retenção, sensor de fluxo de água, sensores de pressão e sensores de temperatura.

Haverá oito válvulas de retenção no sistema de expansão indireta com *chiller* de condensação a ar. Estas válvulas não necessitam ser controladas e tem a função de permitir a passagem exclusivamente em um sentido.

As válvulas de retenção das bombas primárias tem a função de impedir que haja uma elevação de pressão nas bombas que estiverem desligadas. Por exemplo, se 3 bombas estiverem ligadas e 5 desligadas, se não houvesse as válvulas de retenção a água poderia

voltar pelas 5 bombas desligadas. Desta forma, com as válvulas a água seguirá sempre em direção aos *chillers*, e nunca de volta para as bombas primárias.

As duas válvulas de retenção da redundância tem a função de permitir que a água flua de volta para as bombas primárias caso as bombas secundárias estejam desligadas. Trata-se de um sistema de proteção, que será utilizado caso haja algum problema e as bombas não sejam ligadas em conjunto.

Como forma de monitoramento para evitar falhas (sistema de segurança), o sensor de fluxo de água supervisiona a passagem de água pela redundância. Caso haja um volume de água acima do previsto passando por estas tubulações significa que as bombas primárias estão ligadas, mas as secundárias não estão. Neste caso o operador ou o próprio sistema de controle pode corrigir o problema.

Além disso, haverá três sensores de temperatura na tubulação de água. Um deles deverá medir a temperatura da água mais quente que vem dos *fan-coils* e o outro deverá medir a temperatura da água mais gelada que sai dos *chillers* (um sensor para cada *chiller*). A temperatura da água mais quente normalmente fica entre 12 e 14°C. Consideraremos que esta será representada pela temperatura de *setpoint* quente, com a sigla TSQ. A temperatura da água mais fria, de forma geral, gira em torno de 6 e 8°C e, para este projeto, consideraremos que esta temperatura é TSF (temperatura de *setpoint* fria). Caso a temperatura de saída ou chegada estejam muito abaixo ou muito acima de TSQ e TSF, o operador ou o próprio sistema pode ajustar os atuadores para que o resfriamento seja feito corretamente. A TSF e TSQ devem ser selecionadas pelo projetista do sistema de água gelada com *chiller* a ar para o edifício e, para este projeto, não será determinado um valor fixo para estes *setpoints*.

Existirão também dois sensores de pressão posicionados nas saídas das duas bombas secundárias. Estes sensores farão o monitoramento do funcionamento das bombas secundárias através das variáveis PSBS1 e PSBS2 (pressão de *setpoint* das bombas secundárias 1 e 2).. Caso a pressão esteja mais elevada que a prevista para cada bomba significa que há algum problema com o equipamento ou com o sistema.

Todos os componentes descritos neste tópico são utilizados unicamente para segurança e supervisão do sistema. São eles que indicarão caso ocorra alguma falha no sistema ou algum problema nos equipamentos.

2.4.5 Representação ilustrativa do sistema

A Figura 2.7 mostra um esquema representativo do sistema de ar condicionado com *chillers* de água gelada com condensação a ar do edifício n-ZEB. No sistema são utilizados três *chillers*, oito bombas primárias de ação liga desliga, duas bombas secundárias de ação proporcional, três válvulas para controle de fluxo de água, nove válvulas de retenção e três sensores de temperatura.

Como a água deve percorrer toda a distância entre o *chiller* e o *fan-coil* sem se aquecer, a tubulação de água deve ser devidamente isolada para garantir a estabilidade térmica. Normalmente a tubulação é feita de aço, polipropileno ou cobre. O isolamento para evitar as perdas de calor é feito com Poliestireno e Borracha Elastomérica. Isto eleva o custo do material, mas é necessário para garantir que todo o processo ocorra de forma apropriada diminuindo os gastos energéticos.

O esquema representativo da Fig 2.7 ilustra basicamente como será o ciclo de resfriamento por expansão indireta com *chiller* de condensação a ar do edifício n-ZEB, que será descrito em seguida:

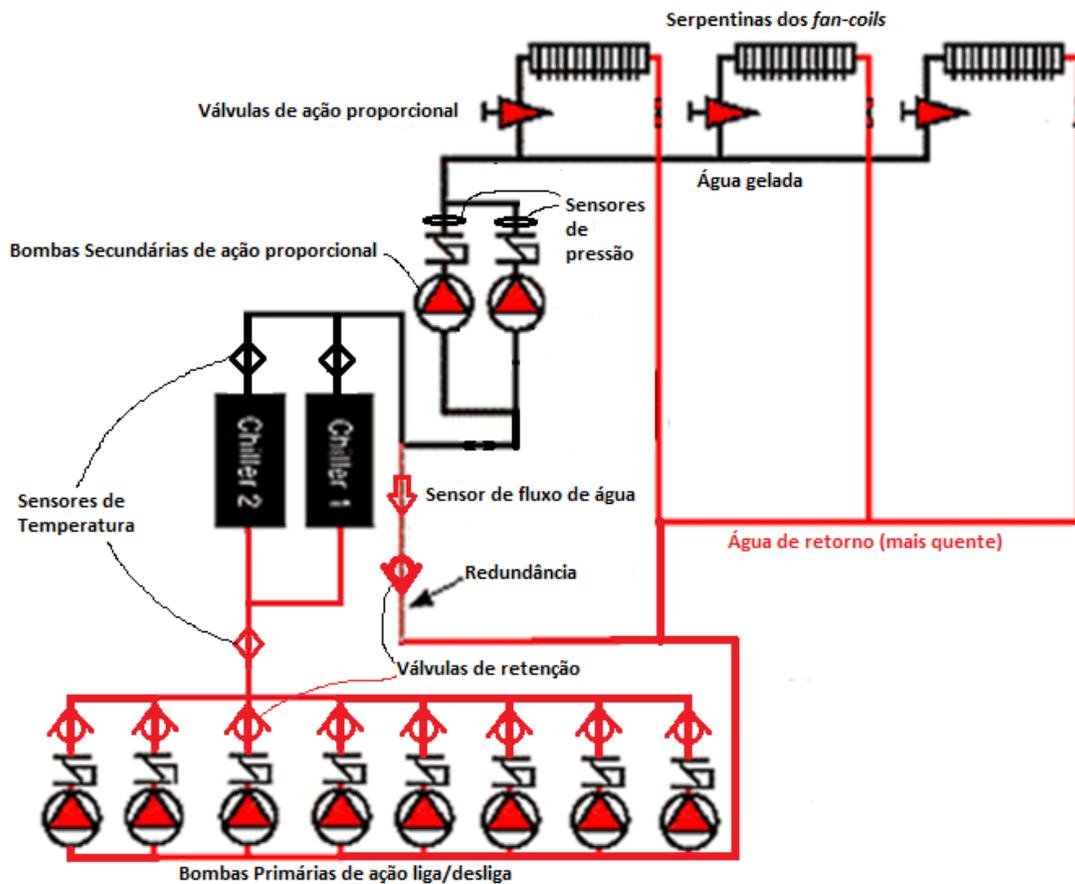


Figura 2.7 Esquema representativo do sistema de *chillers* de água gelada com condensação a ar para o edifício n-ZEB

1. A água é bombeada pelas bombas primárias até os *chillers* e sua temperatura é determinada pelo sensor;
2. Os *chillers* resfriam a água de forma a atender a demanda do edifício;
3. Caso não haja válvulas abertas ou as bombas secundárias estejam desligadas, o sistema circula de volta para as bombas primárias pelo duto de redundância (evitando acidentes causados por pressões elevadas);
4. As bombas secundárias enviam a água gelada que sai dos *chillers* (que também tem sua temperatura medida) pelos dutos até a serpentina do *fan-coil*;
5. As válvulas regulam a passagem de água para os *chillers* de acordo com a demanda do edifício;
6. Após resfriada, a água agora mais quente volta para as bombas primárias para ser bombeada novamente pelas bombas primárias até os *chillers* e reiniciar o processo.

É importante ressaltar que o ventilador do *fan-coil* será controlado por um sistema VAV, que regulando a potência deste equipamento, fará o controle do fluxo de ar para que o sistema seja refrigerado de acordo com a necessidade. Além dos sensores internos instalados nos ambientes, este sistema de Volume de Ar Variável (VAV) utilizará outros sensores e atuadores que serão explicados no capítulo seguinte.

2.5 MECANISMOS ADICIONAIS PARA UM MAIOR DESEMPENHO DO SISTEMA

Com tudo o que foi explicado anteriormente neste capítulo, o leitor pode ter uma boa ideia de como funcionará o sistema de refrigeração do edifício.

Este sistema de refrigeração por si só seria suficiente para atender a demanda térmica do prédio n-ZEB, contudo, o objetivo do projeto é, além de garantir que se tenha total conforto térmico interno, garantir que haverá baixo gasto energético para que o edifício tenha gasto energético resultante total igual a zero.

Portanto, o sistema de refrigeração exposto anteriormente será otimizado pelo sistema de VAV (já comentado anteriormente) e pela estratégia de *free cooling* (ambos serão detalhados no próximo capítulo), que irão trabalhar em conjunto. Assim como aconteceu com o sistema de refrigeração mostrado neste capítulo, os sistemas de VAV e *free cooling* serão explicados com detalhes no próximo capítulo com foco em no funcionamento de seu sistema para o projeto do controle.

Além disso, haverá também um sistema de resfriamento evaporativo. Este sistema é mais simples e menos eficiente que o de expansão indireta com *chiller* a ar, entretanto seu gasto energético também é muito menor. Desta forma, quando não houver necessidade de se diminuir a temperatura de forma excessiva, o resfriamento evaporativo será utilizado para garantir a climatização do edifício.

3 SISTEMA DE VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV) COMO ALIADO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR EXPANSÃO COM CHILLER

Este capítulo se presta a apresentar o funcionamento de um sistema de VAV (*Variable Air Volume*) com suas características e detalhamento para o projeto do controle. Este sistema será aplicado e projetado de forma conjunta ao sistema de climatização por expansão indireta com *chiller* de condensação a ar para o edifício n-ZEB.

3.1 CONCEITUAÇÃO DO SISTEMA DE VAV

Sistemas de VAV são muito utilizados em edifícios que propõe o conforto de seus ocupantes. Estes edifícios possuem sistemas integrados de sensores e atuadores para garantir que as pessoas se sintam confortáveis quanto a conforto térmico, conforto ergométrico e conforto visual por exemplo. Normalmente são ambientes de alta tecnologia que visam sustentabilidade e economia além da máxima eficiência. O edifício n-ZEB deverá fazer parte desta gama de edifícios inteligentes e com total autonomia energética.

Quando há necessidade de se fazer o controle de temperatura de um ambiente amplo como um auditório ou uma fábrica, é preciso determinar uma temperatura *setpoint* para todo o ambiente, de forma a manter o conforto térmico. Contudo, para manter a temperatura de conforto em vários ambientes pequenos simultaneamente, o problema se torna mais complexo. Esta questão é resolvida instalando-se um sistema de VAV (velocidade de ar variável) individual para cada ambiente ou para um conjunto selecionado de ambientes.

Este sistema funciona com o uso de caixas de VAV que controlam o fluxo de ar no ambiente. Estas caixas são equipamentos que possibilitam a passagem de ar através de um duto variando o fluxo para cada ambiente de acordo com a temperatura e do *setpoint* escolhido para o maior conforto térmico no local. O controle da quantidade de ar emitido é feito pelos *dampers*, que são mecanismos que obstruem ou liberam a passagem do ar, como mostrado na Fig 3.1.

Os *dampers* atuam de acordo com um sensor de temperatura instalado no interior do ambiente a ser resfriado, um sensor de fluxo de ar fixado dentro do duto de ventilação antes do *damper*, e um sensor de pressão que monitora a pressão dentro do duto.

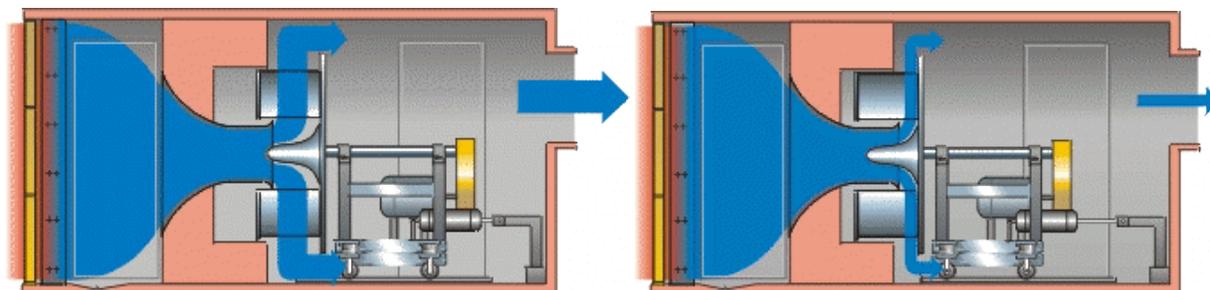


Figura 3.1. Funcionamento dos *dampers*. (Dunkleberger *et al*, 2015)

A função do sensor de temperatura é medir a temperatura interna do ambiente para que o sistema determine se a temperatura deve ser aumentada ou reduzida. Caso a temperatura ambiente esteja abaixo do *setpoint* predeterminado, o sistema envia um comando para que o *damper* diminua a passagem de ar e, conseqüentemente, diminua a ventilação, fazendo com que a temperatura se eleve no ambiente. Se a temperatura ambiente estiver acima do *setpoint*, o *damper* recebe um comando para permitir mais passagem de ar, resfriando o ambiente. No caso de a temperatura já estiver no *setpoint*, o sistema mantém o *damper* com uma abertura suficiente para manter aquela temperatura.

Com a abertura e fechamento do *damper*, ocorre uma variação do fluxo de ar dentro dos dutos de ventilação. Este fluxo é medido pelo sensor de fluxo de ar, que se comunica com o resto do sistema para informar a necessidade de maior ou menor passagem de ar para que a temperatura de *setpoint* seja atingida e para que as exigências de ventilação sejam atendidas.

Quanto menor o fluxo de ar para fora do duto, maior a sua pressão interna. Isso ocorre, pois o ar enviado pelo ventilador fica bloqueado pelo *damper* meio fechado e se acumula, fazendo com que a pressão se eleve. Da mesma forma, quanto maior o fluxo de ar menor a pressão interna. Para que ocorra o funcionamento eficiente, uma pressão de *setpoint* é determinada para que o sistema sempre mantenha esta pressão dentro dos dutos de ventilação.

Assim, de acordo com a pressão obtida dentro dos dutos, a controladora envia um comando ao ventilador central para que diminua ou aumente sua potência de forma a atingir novamente a pressão de *setpoint*. Quanto mais pressão interna no duto de ventilação, maior é

o acúmulo de ar, e conseqüentemente o ventilador pode utilizar menos potência para manter a temperatura no valor de *setpoint*. Este mecanismo diminui o gasto energético do sistema de ventilação, garantindo que seja fornecida apenas a potência necessária para o fluxo de ar permitido pelos *dampers*. Um esquema dos diversos equipamentos básicos contidos no sistema de VAV é mostrado na fig 3.2.

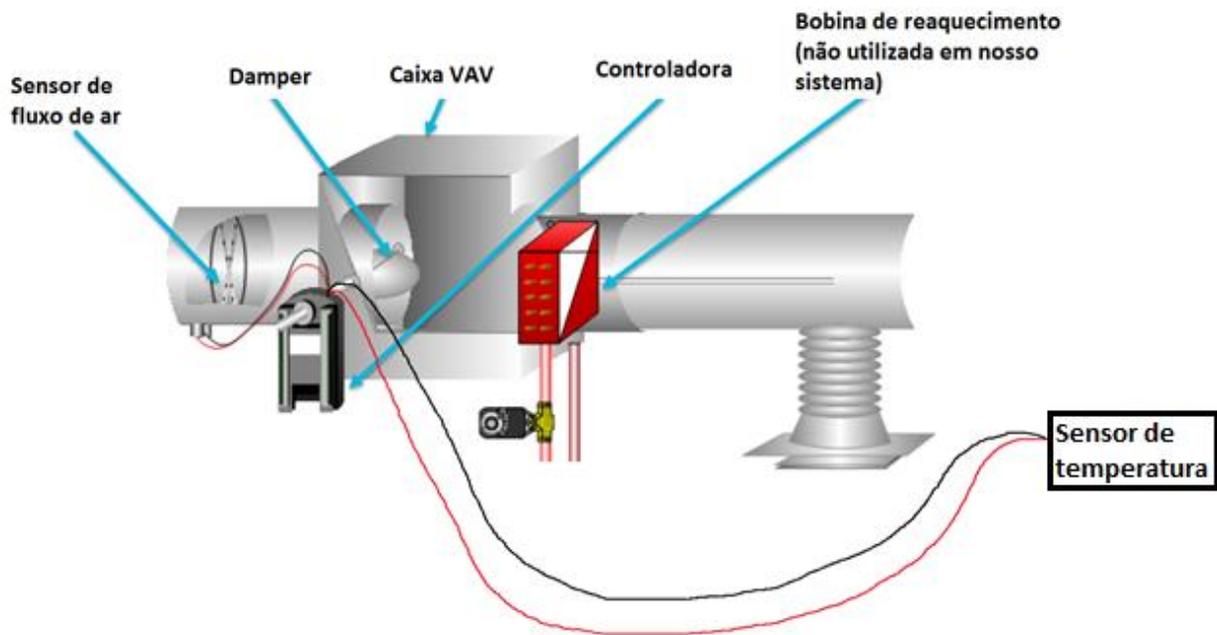


Figura 3.2. Componentes básicos de um sistema VAV (The News, 2006)

É importante salientar que o sistema de VAV trabalha em conjunto com o sistema de resfriamento e, desta forma ambos devem ser projetados juntamente para obter-se um sistema de controle eficiente. No caso do sistema de resfriamento por expansão indireta com *chillers*, (proposto no trabalho de Teixeira, 2015, que será utilizado como base para o projeto de controle deste trabalho) as unidades de resfriamento (*fan-coils*) serão distribuídas de forma a haver uma destas unidades por pavimento. Essa distribuição foi sugerida por Teixeira (2015) após varias simulações e cálculos das cargas térmicas do edifício. Deve-se notar, contudo, que apesar de ter sido escolhida, esta não é a única forma de integrar o sistema de *chillers* ao sistema HVAC: é possível utilizar um *fan-coil* central para todo o edifício ou mesmo um *fan-coil* para cada caixa de VAV.

Como o tamanho das caixas de VAV determina sua capacidade de resfriamento, é necessário que se faça seu dimensionamento de forma a atender à demanda de conforto térmico de cada ambiente. Se a caixa for muito pequena, não ocorrerá resfriamento suficiente

do sistema. Caso a caixa seja muito grande, uma pequena variação na abertura do *damper* pode ocasionar uma variação brusca de temperatura, o que tornaria inviável o controle do sistema. Neste trabalho, o objetivo principal é o projeto do sistema de controle e, desta forma foi considerado que todas as caixas VAV foram previamente dimensionadas para atender a sua demanda com precisão.

Além do sistema convencional explicado acima, é possível adicionar um sistema de reaquecimento na caixa VAV (fig 3.2). O objetivo deste sistema é acelerar o processo de estabilização da temperatura no *setpoint*, além de aquecer o ambiente quando necessário. Como em Brasília não é necessário haver aquecimento em nenhuma época do ano durante os horários comerciais, um sistema de reaquecimento seria um desperdício de energia.

3.2 COMPONENTES BÁSICOS DE UMA CAIXA VAV

Para facilitar o entendimento do sistema, são listados abaixo os componentes comumente encontrados em uma caixa VAV. Alguns destes componentes foram explicados brevemente na seção anterior e agora serão explicados novamente com mais detalhes. A fig 3.3 mostra um exemplo de caixa de VAV real e alguns componentes.



Figura 3.3. Caixa de VAV real (Trox Brasil, 2015)

3.2.1 Capa (caixa)

Normalmente cilíndrica ou retangular e feita de aço inox galvanizado para maior durabilidade.

3.2.2 Entrada

É uma conexão cilíndrica ou retangular para conectar a caixa de VAV ao sistema de tubulação do edifício.

3.2.3 Saída

É o sistema de conexão da caixa VAV com o ambiente. Normalmente é composto por uma grade que permite a passagem de ar e evita entrada de objetos ou insetos.

3.2.4 Damper

É o mecanismo utilizado para abrir e fechar a passagem de ar na caixa VAV. Este componente é responsável pela variação do volume de ar dentro da caixa, e é um dos principais componentes do sistema. O *damper* deve ser conectado ao sistema de controle (e ao sensor de temperatura colocado no ambiente) para operar de acordo com as necessidades do ambiente.

3.2.5 Eixo do Damper

É a ferramenta que garante a abertura e fechamento do *damper*. Normalmente fica acoplado a um servo motor ou a um motor convencional de corrente contínua conectado ao sistema de controle.

3.2.6 Ventilador

Em muitos sistemas de VAV pode haver um ventilador interno que garante maior desempenho para o sistema. No caso deste projeto e baseando-se no sistema proposto por Teixeira (2015) em seu trabalho, não haverá um ventilador acoplado à caixa VAV. A ventilação dos ambientes será realizada pelo sistema de ventilação contido em cada pavimento (acoplado à serpentina de resfriamento) chamado *fan-coil*. O *fan-coil* de forma resumida é um ventilador acoplado a uma serpentina por onde passa a água gelada. Mais detalhes podem ser encontrados no capítulo anterior.

3.2.7 Serpentina de reaquecimento (*reheat coil*)

O objetivo deste sistema é acelerar o processo de estabilização da temperatura no *setpoint*. Ao fazer o resfriamento do sistema, a temperatura alcança o *setpoint* e, caso esteja bem projetado, cai um pouco abaixo deste devido à dificuldade do sistema de estabilizar a temperatura instantaneamente (por isso deve haver um sistema de controle eficiente). Este pequeno *overshoot* de temperatura deve ser corrigido. Quando não há uma serpentina de reaquecimento, a abertura dos *dampers* é diminuída para que ocorra menos entrada de ventilação no ambiente e a temperatura suba levemente até alcançar o *setpoint* novamente. Caso haja uma serpentina de reaquecimento, este equipamento garante que a temperatura vai subir mais rapidamente até a temperatura de *setpoint*, diminuindo o tempo de desconforto térmico causado pela baixa temperatura de *overshoot*. Além disso, em caso de necessidade, a serpentina de reaquecimento pode operar no aquecimento do ambiente.

O sistema proposto não terá serpentinas de reaquecimento, pois, conforme já mencionado anteriormente, para o clima no Distrito Federal não há necessidade de aquecimento para os ambientes. Além disso, se acrescentássemos este equipamento ao sistema, o gasto energético seria muito grande para um benefício desnecessário.

3.2.8 Sensor de temperatura

O sensor de temperatura não é um componente interno da caixa VAV, mas deve funcionar em conjunto para que o sistema funcione apropriadamente. Basicamente o sensor mede a temperatura do ambiente e envia os dados ao sistema de controle para que este faça o controle de fechamento e abertura do *dampers*. Para isto, é determinada uma temperatura de *setpoint* que deverá ser mantida pelo sistema. Quando o sensor medir uma temperatura mais alta ou mais baixa que a pré-determinada, a caixa de VAV do ambiente deve agir para corrigir esta temperatura.

3.2.9 Sensor de pressão

O Sensor de pressão mede a pressão interna no duto de ventilação para que o sistema possa identificar quando o ar estiver estagnado devido ao fechamento do *dampers* de uma ou de várias caixas VAV. Quanto maior a pressão, significa que os *dampers* estão mais fechados e, desta forma, o ventilador central pode diminuir sua potência para diminuir o gasto energético.

3.2.10 Sensor de fluxo de ar

O Sensor de fluxo de ar mede a quantidade de ar que passa por cada caixa de VAV. É utilizado pelo sistema para determinar a necessidade de abrir ou fechar cada *dampers* para haver mais ou menos passagem de ar ao ambiente.

Normalmente, são dispostos em um eixo em formato de X que transpassa o tubo de ventilação (Fig 3.4.). Esta disposição garante que o fluxo será medido corretamente em todos os pontos do duto.

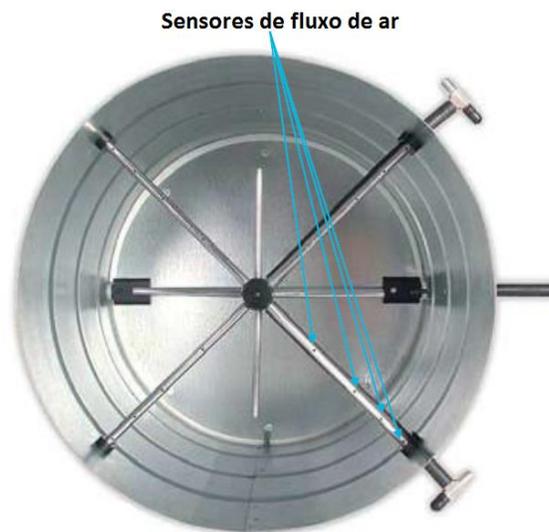


Figura 3.4. Posicionamento dos sensores de fluxo de ar (Trox Brasil, 2015)

3.3 ESTRATÉGIAS PARA AUMENTO DA PERFORMANCE DO SISTEMA

Para garantir que um sistema de VAV tenha uma boa performance, é necessário usar estratégias otimizadas de controle. Tais estratégias diminuem o gasto energético e aumentam a eficiência do sistema como um todo.

3.3.1 Ligamento e desligamento ótimo

O ligamento ótimo é uma estratégia de controle que usa um sistema de automação predial para prever o tempo necessário para que o ambiente atinja a temperatura nominal de ocupação para conforto térmico quando estiver ocupado (temperatura de *setpoint* para ocupação). Desta forma, o sistema espera o máximo possível para ser ativado e ainda atingir a temperatura ótima

antes da ocupação. Esta estratégia evita que o sistema fique ligado por períodos que não esteja havendo ocupação, reduzindo o consumo energético.

O desligamento ótimo é uma estratégia de controle que usa um sistema de automação predial para determinar o período de tempo que o sistema pode ser desativado antes da desocupação do ambiente, de forma a garantir que a temperatura não varie muito acima ou abaixo da temperatura nominal de ocupação (temperatura de *setpoint*). Neste caso, apenas o sistema de resfriamento com *chillers* (resfriamento indireto) deve ser desativado. O sistema de ventilação continua operando para garantir a ventilação exigida pela norma para o ambiente.

Na Fig 3.5 é apresentado um exemplo de ligamento e desligamento ótimo para um sistema de aquecimento.

Uma análise similar pode ser feita para um sistema de resfriamento. É possível observar que o sistema foi ligado às 6 da manhã, de forma que, um pouco antes das 7 horas, a temperatura já está no *setpoint* de ocupação. Este período de alguns minutos é suficiente para que ocorra o ajuste da temperatura no ambiente de forma a atingir o conforto térmico no horário da ocupação. Já às 6 da tarde, o sistema é desativado, contudo a temperatura de *setpoint* de ocupação é mantida até poucos minutos antes das 7 horas (devido à inércia térmica do próprio ambiente que mantém a temperatura interna por alguns minutos) e nos minutos restantes até a desocupação do edifício a temperatura varia não mais do que 1 ou 2 graus. Esta pequena variação mal será notada pelos ocupantes durante o curto espaço de tempo que resta até a desocupação.

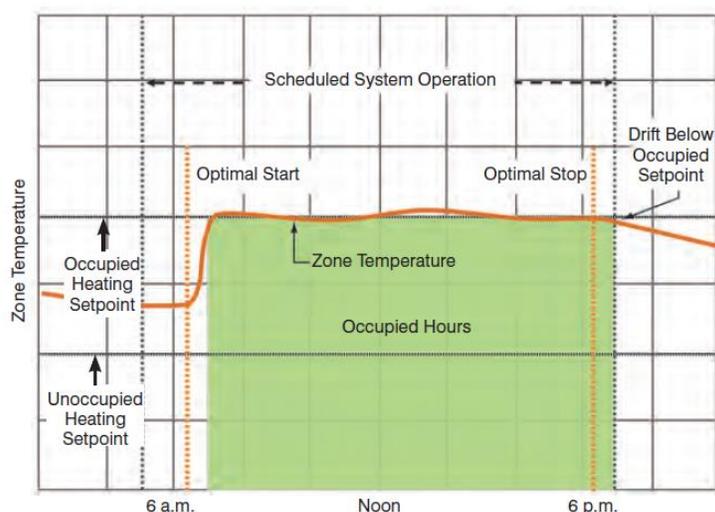


Figura 3.5. Exemplo de ligamento e desligamento ótimo. (Murphy, 2011)

Portanto, utilizar a estratégia de ligamento e desligamento ótimo garante que o sistema de VAV não ficará ligado além do tempo necessário. É preciso ajustar esta estratégia para que não cause desconforto térmico no início da manhã e no final da tarde, mas se o sistema for bem parametrizado seus resultados são muito satisfatórios.

3.3.2 Otimização da pressão de ventilação

Com a variação da temperatura ambiente, os terminais de VAV modulam a variação do fluxo de ar para corrigir a temperatura interna até alcançar o *setpoint*. Esta variação de fluxo é feita pelos *dampers* e causa uma variação da pressão interna do sistema de dutos de ventilação.

Para haver o controle dessa pressão interna dos dutos, é utilizado o sensor de pressão, que normalmente é colocado aproximadamente dois terços da distancia entre a ultima caixa VAV e o sistema central de ventilação (fig 3.6). Ao medir esta pressão o sistema identifica a necessidade de aumentar ou diminuir a potência do ventilador central (acoplado no *fan-coil*) de cada pavimento para se atingir a pressão de *setpoint* previamente determinada.

Quando se utilizam controladores de comunicação nos terminais VAV, é possível aperfeiçoar este controle e economizar ainda mais energia. O sistema de controle identifica a posição de cada *damper* e, desta forma, procura pelo *damper* mais distante e com maior abertura (Terminal VAV crítico). Assim, com auxílio do sensor de pressão, a potência do ventilador é reajustada para que a pressão de *setpoint* seja mantida e, desta forma, seja fornecido fluxo suficiente para que o ar chegue até este terminal crítico.

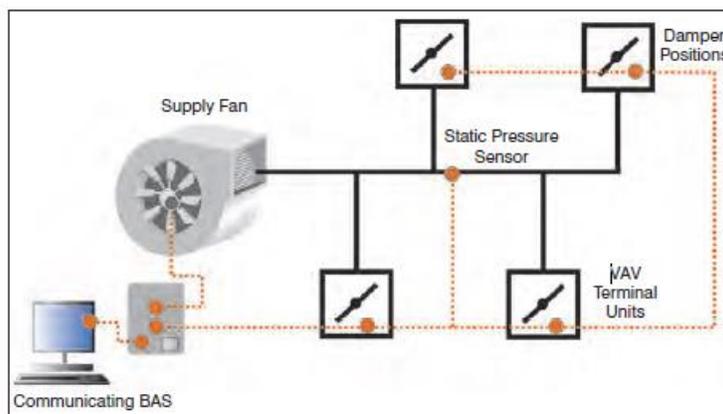


Figura 3.6. Otimização da pressão de ventilação (Murphy, 2011)

Caso o edifício esteja parcialmente ocupado, grande parte dos *dampers* estarão fechados, aumentando a pressão interna dos dutos de ventilação. O sistema identifica a situação com o sensor interno de pressão e diminui drasticamente a potência do ventilador, gerando grande economia de energia.

No Edifício n-ZEB será utilizado um sensor por pavimento, de forma que a potência do ventilador do *fan-coil* será ajustada para suprir a demanda do edifício sem gerar gastos energéticos desnecessários.

Identificação das “Rogue Zones”

A estratégia de otimização da pressão de ventilação garante ainda que o operador identifique as “Rogue Zones”, ou Zonas de Falhas. Uma “Rogue Zone” é uma zona onde alguma coisa não está trabalhando apropriadamente. Algumas possíveis causas destas falhas podem ser um terminal mal projetado, um bloqueio no duto que causa má ventilação, uma temperatura de *setpoint* muito baixa ou muito alta ou mesmo um sensor de temperatura instalado próximo a um emissor de calor (como uma cafeteira) ou sob a luz do sol.

Para que estas zonas sejam identificadas, normalmente é necessário que os operadores sejam informados pelos ocupantes insatisfeitos. Contudo, um sistema central de controle utilizando a estratégia de otimização da pressão obtém dados do terminal VAV e fornece gráficos ou tabelas que possibilitam a identificação e correção destes problemas.

A Figura 3.7 exemplifica a situação com um gráfico da posição do *damper* de cada terminal VAV em função da hora do dia para um edifício fictício. Pode-se notar neste gráfico que o *damper* para a caixa da sala 204 permanece muito aberto durante a maior parte do dia. Isto pode apontar que há um problema com este terminal (uma “rogue zone”). Assim deve-se enviar um técnico para corrigir o problema de forma que o sistema passe a funcionar perfeitamente.

O procedimento descrito pode ser realizado em todas as zonas com problemas até que não haja mais nenhuma “Rogue Zone”. Portanto, durante pouco tempo todo o sistema fica livre de problemas, e os gráficos e tabelas gerados pelo sistema podem ser utilizados apenas para manutenções preventivas.

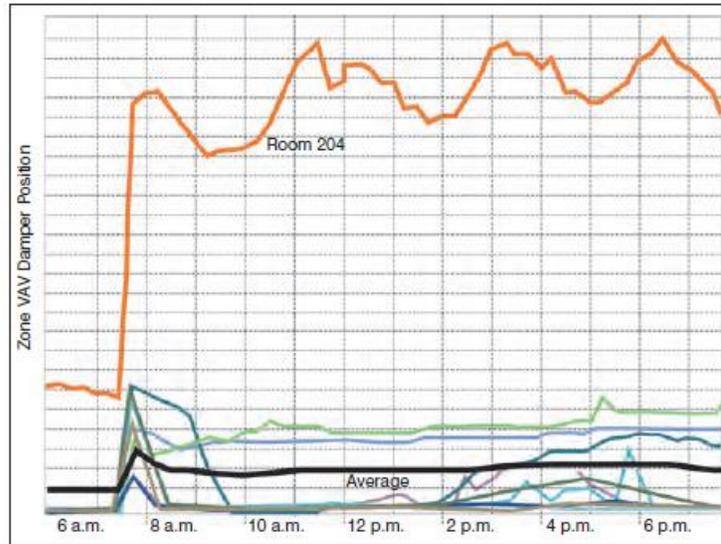


Figura 3.7. Posição dos *dampers* de um edifício fictício, (Murphy, 2011)

3.3.3 Otimização da ventilação com *free cooling*.

Um dos objetivos do sistema VAV é fornecer ar fresco a um ambiente controlado. O controle da demanda de ventilação garante que haverá fornecimento adequado de ar mesmo quando houver variação na ocupação interna do ambiente.

Para que o monitoramento de ocupação seja feito, é possível utilizar sensor de dióxido de carbono (CO₂), sensor de ocupação (sensor de presença) ou um cronograma de horários do dia. Um esquema ilustrativo destes três tipos de monitoramento implementados num sistema VAV pode ser observado na Fig 3.8.

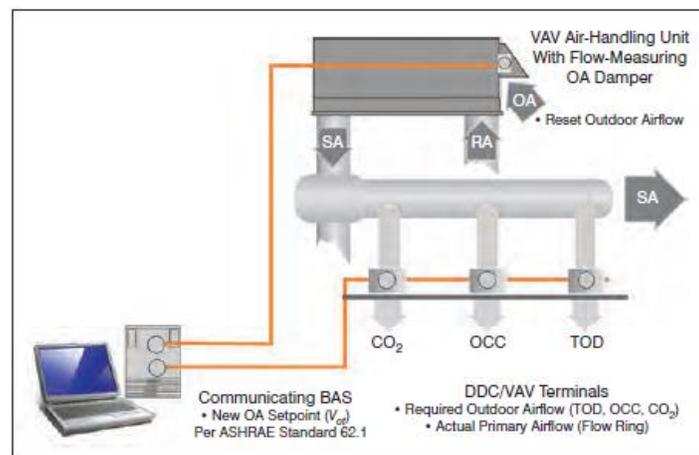


Figura 3.8. Tipos de monitoramento para o controle de demanda de ventilação. (Murphy, 2011)

3.3.3.1 Sensor de CO2

No exemplo demonstrado na Fig 3.8, os sensores de CO2 são usados apenas nas zonas densamente ocupadas e demonstram variação muito alta no padrão de ocupação (zonas como auditórios e salas de conferências).

Neste caso a controladora determina a quantidade de ventilação requerida para aquela zona baseado nas concentrações de CO2 medidas. Quanto mais pessoas ocuparem o local, maior será a emissão de CO2, e mais ventilado o ambiente deve ser.

3.3.3.2 Sensor de presença

Zonas que possuem uma densidade mais baixa de ocupação ou tem pouca variação na ocupação durante o dia são mais indicadas para sensores de presença. No caso do edifício n-ZEB haverá sensores de presença em todos os ambientes que houver caixa VAV. Para os ambientes com alto fluxo de pessoas haverá um sensor de presença e um de CO2

Desta forma, sempre que houver ocupação no local, independente da quantidade de pessoas, o sistema de ventilação será ativado mantendo os níveis aceitáveis. Caso não haja ocupação o sistema VAV diminui a abertura dos *dampers* para manter apenas o nível de ventilação padrão previsto pela norma 62.1 da ASHRAE.

3.3.3.3 Cronograma de horários

Este tipo de monitoramento pode e deve ser realizado quando for possível fazer uma previsão dos horários de ocupação de cada ambiente. Este cronograma pode indicar quando a zona estará normalmente ocupada ou quando estará desocupada ou pode ainda ser usado para variar a ventilação antecipadamente à ocupação.

Esta estratégia funciona quase como o ligamento e desligamento ótimos, já que neste caso é preciso saber o horário que haverá ocupação para que o sistema seja previamente ligado.

3.3.3.4 Estratégia para o edifício n-ZEB: ventilação e *free cooling*

Quando um sensor é utilizado juntamente com um cronograma de horários, este sensor pode ser ajustado para monitorar alguma variação nos padrões de ocupação esperados. Esta

combinação, sensor mais cronograma, pode ser usada para alterar o sistema para um modo de espera temporário. Este modo de espera é resultado desta variação não periódica do cronograma e, quando a situação voltar ao normal, o cronograma deve voltar a ser seguido.

Deste modo, quando uma área que deveria ser previamente ocupada estiver desocupada, o sistema VAV deve aumentar a temperatura de *setpoint* em 1 ou 2 graus Celsius e conseqüentemente diminuir a abertura dos *dampers* para que a ventilação seja reduzida e, desta forma, aumente a economia de energia. Além disso, a ventilação do ambiente também deve ser reduzida para manter os requisitos padrões de ventilação determinados pela norma 62.1 da ASHRAE.

O mesmo pode ser feito em um ambiente que não deveria estar ocupado. Caso haja alguém neste ambiente, o sistema deve ligar e manter a temperatura de *setpoint* pré-determinada até que o ambiente seja desocupado.

Para esta estratégia no edifício n-ZEB, em todos os ambientes, exceto nos auditórios, salas multiuso grandes e salas de conferência, haverá apenas sensores de presença para monitorar se há ocupantes ou não. Naqueles locais com maior ocupação de pessoas (auditórios, salas multiuso grandes e salas de conferência) serão utilizados sensores de CO2 e de presença para aumentar a precisão da detecção da quantidade de pessoas naqueles ambientes.

Haverá ainda três *dampers* especialmente designados para garantir a entrada e saída do ar externo em cada pavimento:

1. **Damper de free cooling:** terá o objetivo de abrir ou fechar a passagem de ar externo para dentro do ambiente. No edifício n-ZEB haverá um destes *dampers* por pavimento. Eles serão acoplados a um duto de ar que vem da parte externa do edifício e conduz o ar até o ventilador do *fan-coil* para então se interligar com os demais dutos do sistema VAV. Eles terão dois objetivos: O primeiro é garantir que haja a ventilação exigida pela norma quando o ar externo for frio o suficiente; o segundo é permitir que o ar entre no edifício quando a temperatura externa for baixa suficiente para garantir o conforto térmico dos ambientes internos.
2. **Damper de retorno:** Vai garantir a abertura e fechamento da passagem do ar de retorno (ar que vem do ambiente interno a ser climatizado novamente e é reenviado para os ambientes internos). Existirá um *damper* de retorno para cada caixa VAV. Ele será acoplado a um sistema de captação do ar interno (pelo menos um por

ambiente), que nada mais é que um orifício para entrada de ar. Quando o *damper* de retorno for aberto, ele garantirá que o ar interno volte a circular pelos dutos e seja climatizado novamente.

3. **Damper barométrico:** O terceiro *damper* será chamado de *damper* barométrico, e é responsável por abrir ou fechar a passagem do ar de retorno até a saída de ar do edifício. A saída do ar garante que a pressão do edifício vai permanecer constante caso haja entrada de ar externo (daí o nome *damper* barométrico). No edifício deverá existir um *damper* barométrico para cada *damper* de retorno. Eles ficarão acoplados a um duto conectado ao sistema de captação do ar interno (os mesmos dos *dampers* de retorno). Este duto conduz o ar de retorno de cada ambiente interno para o ambiente externo. Desta forma, quando aberto, possibilitará a saída do ar para fora do edifício.

Estes sistemas de entrada de ar externo e circulação do ar interno, bem como os respectivos *dampers*, são mostrados nas Fig 3.9 e Fig 3.10 e seus funcionamentos serão explicados com detalhes a seguir.

Para se monitorar a temperatura do ambiente externo, serão utilizados quatro sensores de temperatura. Como a temperatura externa pode mudar dependendo do local que é medida, cada um destes sensores será posicionado em um canto do prédio para monitorar a temperatura naquele local. Desta forma evita-se que, por exemplo, a temperatura de uma área com alta insolação seja monitorada e o sistema identifique que a temperatura externa está mais alta do que realmente está.

Das quatro temperaturas monitoradas, duas irão ser ignoradas: a mais alta e a mais baixa. Isso garante que as regiões de alta insolação ou uma região ligeiramente mais fria não irão determinar a temperatura real externa. Com as duas temperaturas restantes, será feita uma média aritmética, e o resultado será considerado como sendo a temperatura externa real.

É possível perceber que, no sistema convencional de VAV mostrado na Fig 3.9, o *damper* de *free cooling* permanece fechado impedindo a entrada do ar exterior (neste caso pressupõe-se que o ar externo está com uma temperatura elevada). Já o *damper* de retorno permanece aberto de forma a garantir que o ar de retorno (ar dentro do ambiente no momento) circule e seja climatizado novamente para ser reenviado aos ambientes do edifício. O *damper* barométrico também permanece fechado já que não há entrada de ar externo e dessa forma não é necessário que o ar vá para fora do edifício.

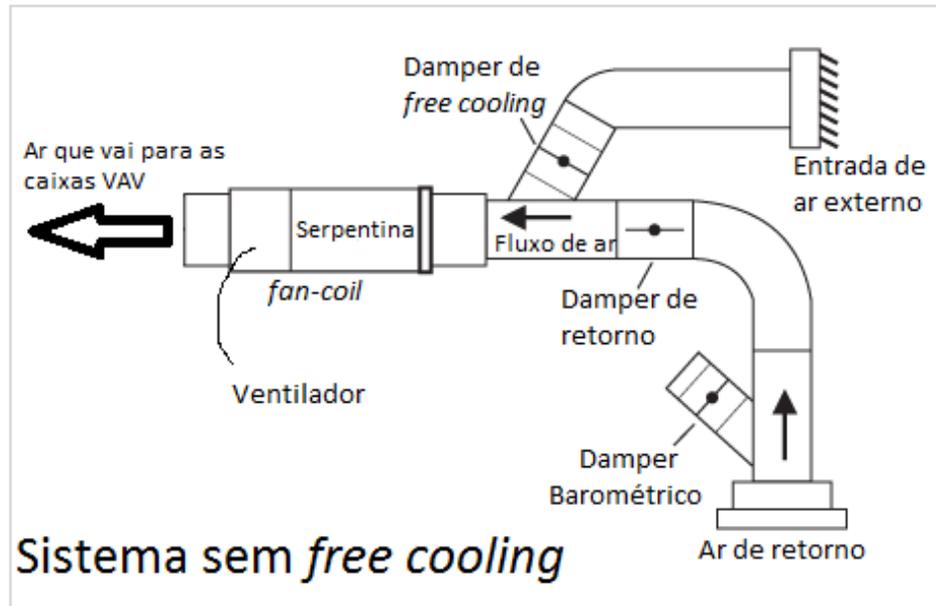


Figura 3.9 Sistema de VAV sem *free cooling*

No sistema descrito acima (sem o *free cooling*), o ar interno vai circular dos ambientes até os dutos, ser climatizado novamente e então reenviado para o ambiente. Não há, portanto, participação do ar externo no processo.

Neste caso, sem utilizar o *free cooling*, todo o sistema de resfriamento por expansão indireta com *chiller* a ar, inclusive os *fan-coils* e os ventiladores devem ser ativado para garantir a climatização e o conforto interno do edifício quando houver ocupação. Como já mencionado, esta ativação será de forma quantificada e controlada para diminuir os gastos energéticos

A Figura 3.10 ilustra como funcionará o sistema de VAV com o *free cooling*. Neste caso o *damper* de *free cooling* se abre permitindo que o ar externo entre no sistema de dutos (pressupõe-se que o ar externo está frio suficiente para garantir a climatização do edifício). No prédio n-ZEB, a entrada de ar deverá ser feita por um duto previamente modelado para atender as necessidades térmicas do edifício. Este duto conduz o ar até o ventilador do *fan-coil* para ser impulsionado para os ambientes internos.

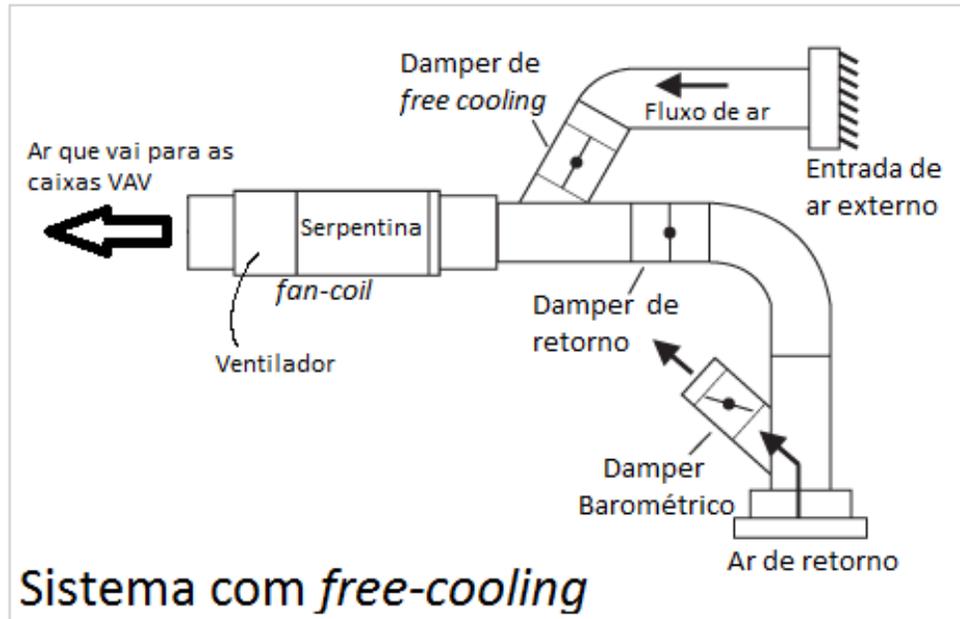


Figura 3.10 Sistema de VAV com *free cooling*

O *damper* de retorno, que é acoplado ao sistema de captação do ar interno, se fecha para que o ar de retorno que vem do ambiente interno não volte para o sistema e se misture com o ar externo mais frio.

Para que o ar de retorno tenha um meio de sair do ambiente, o *damper* barométrico (que, como já dito anteriormente, no edifício n-ZEB é acoplado ao mesmo sistema de captação do ar interno do *damper* de retorno) se abre permitindo a saída de ar e garantindo que a pressão interna permaneça constante.

Portanto, o *free cooling* trabalha fazendo a circulação do ar externo por dentro dos ambientes internos do edifício. O ar entra pela abertura do *damper* de *free cooling*, é impulsionado pelo ventilador do *fan-coil* para o ambiente interno a ser climatizado e sai pela abertura do *damper* barométrico (o ar que vem do ambiente externo impulsiona o ar interno para fora). O fechamento do *damper* e retorno impossibilita que haja circulação do ar interno para os dutos de ventilação. O objetivo nesse caso é que o ar externo mais frio entre, e o ar interno mais quente saia para que haja a climatização.

Caso a temperatura seja baixa suficiente, as serpentinas dos *fan-coils* não devem estar refrigerando, ou seja, o sistema de resfriamento por expansão indireta pode permanecer desligado. Os únicos equipamentos em uso para este caso será os *dampers* do edifício e o

ventilador do *fan-coil* que irá impulsionar o ar externo para dentro do edifício. Se a Temperatura externa for média (predeterminada) é possível usar os dois sistemas e forma conjunta.

Desta forma, quando for possível utilizar apenas o *free cooling*, o gasto energético é reduzido de forma bastante expressiva, pois os *chillers* não estarão funcionando. Nos períodos em que o ar externo esteja frio suficiente para garantir o conforto térmico interno, o sistema de *free-cooling* fará sozinho, a climatização ambiente.

Como no Distrito Federal há uma variação muito grande de temperatura durante um único dia, o *free cooling* poderá ser utilizado nos horários em que a temperatura externa for baixa o suficiente, normalmente no início da manhã ou no fim da tarde. Para isto, os sensores de temperatura instalados na parte externa do edifício irão monitorar a temperatura e ativar o *free cooling* quando for possível.

Já nos horários de temperatura mais elevada, os sensores de temperatura externos e internos irão identificar este aumento e o sistema de resfriamento por expansão indireta com *chiller* com condensação a ar será ligado.

Quando a temperatura externa for elevada, será usado o esquema mostrado na figura 3.9, onde a ventilação interna será mantida com o fluxo de ar rotativo, em que o ar quente é climatizado e reenviado aos ambientes. Portanto, quando o *free cooling* puder ser utilizado haverá ventilação com ar externo, e quando não puder a ventilação é feita com o próprio ar dentro do edifício.

O processo descrito nos parágrafos acima pode ser utilizado para a estratégia de ligamento ótimo. Desta forma, durante o início da manhã antes do horário de ocupação, se o ar externo estiver frio o suficiente, a estratégia de *free cooling* pode ser utilizada alguns minutos antes da ocupação do edifício para que quando os ocupantes chegarem o ambiente já esteja oferecendo conforto térmico.

Do mesmo modo, caso no final da tarde o ar externo esteja frio o suficiente, o sistema de resfriamento por expansão indireta pode ser desligado e a climatização mantida pelo *free cooling*. Quando faltarem alguns minutos para a desocupação, o sistema pode ser desligado (ventiladores desligados) utilizando a estratégia de desligamento ótimo.

Portanto, de forma sucinta, o *free cooling* vai possibilitar que haja a climatização apenas com o ar externo nas horas mais frescas do dia como no início da manhã. Durante este período o sistema de resfriamento por expansão indireta com *chiller* de condensação a ar pode permanecer desligado enquanto o resfriamento interno é garantido apenas pelo sistema de

VAV e *free cooling*. Assim, com alguns minutos de economia todos os dias, haverá uma grande redução nos gastos mensais de energia com o uso deste sistema.

3.4 UMA VISÃO SOBRE AS VANTAGENS E DESVANTAGENS DO SISTEMA DE VAV

O sistema de VAV é muito utilizado em todo o mundo e tem se mostrado muito eficiente em vários aspectos. Contudo, existem também alguns problemas que podem surgir ao se beneficiar deste tipo de sistema.

Serão listados a seguir as principais vantagens e desvantagens de se utilizar um sistema de volume de ar variável. Todas elas foram levadas em consideração quando este sistema foi escolhido como a melhor opção para o edifício n-ZEB

3.4.1 Vantagens

O sistema de VAV é muito eficiente, pois tem o objetivo de manter um ambiente numa temperatura pré-selecionada utilizando a menor quantidade de ar possível. Basicamente um sistema de Volume de Ar Variável permite que os *chillers*, ventiladores e sistema de passagem de ar (*dampers*) trabalhem em conjunto, o que aumenta a eficiência do projeto de climatização do ambiente.

Como as caixas de VAV são conectadas a sensores de temperatura, há possibilidade de se controlar a temperatura em cada espaço independente da temperatura nos outros ambientes. Salas com cargas térmicas e padrões de ocupação semelhantes podem ser alocadas com a mesma caixa de VAV, e salas com cargas distintas podem ser alocadas com caixas individuais.

Os sistemas de VAV são muito flexíveis já que as caixas podem ser facilmente removidas de um sistema de dutos e colocadas em outro (caso o designe e as cargas dos ambientes sejam semelhantes).

Uma estratégia de *free cooling* pode ser facilmente integrado ao sistema VAV já existente sem serem necessárias grandes alterações de projeto. Além disso, é possível projetar o sistema já com o *free cooling* incorporado. Com isto, pode-se aumentar ainda mais a economia de energia mantendo-se a eficiência do processo.

Basicamente um sistema VAV pode ser totalmente controlado caso seja utilizado um sistema eficiente de controle central. Isto garante que as diversas variáveis que geram gastos energéticos e mais conforto térmico sejam selecionadas de forma que haja um equilíbrio entre conforto e gastos. Desta forma, o sistema é totalmente parametrizado para não haver desperdício em nenhum período do dia, ou que pelo menos este desperdício seja mínimo.

Estes fatores, juntamente com as pesquisas desenvolvidas por Teixeira (2015) em seu trabalho (que garantem que este sistema vá suprir a carga térmica do edifício satisfatoriamente), foram os principais determinantes para a escolha de um sistema de caixas Volume de ar Variável para o edifício n-ZEB.

3.4.2 Desvantagens

Quando a temperatura de *setpoint* do ambiente é alcançada pelo sistema, o volume de ar transferido para este é diminuído. Isto faz com que o nível de ventilação exigido pela norma muitas vezes não seja atingido. No caso do edifício n-ZEB, o fluxo de ar vai ser garantido, pelo menos em parte, pelos *dampers* de entrada de ar externo quando a temperatura externa não estiver elevada, pelos seus respectivos ventiladores e pelo ventilador do sistema de *fan-coil* em cada pavimento. Mesmo quando a temperatura externa estiver elevada, impossibilitando o uso do ar externo para maior ventilação, o sistema de captação de ar de retorno, mostrado anteriormente na Fig 3.9, garantirá que o ar mantenha-se circulando durante todo o tempo.

Além disso, a instalação de um sistema deste tipo requer muito espaço vertical e horizontal. Como o edifício n-ZEB será projetado para atender todos os requisitos para que se tenha uma condição plena de eficiência energética e conforto interno, o espaço, neste caso, não apresenta grande problema.

Como as caixas de VAV devem ser alocadas no sistema de dutos, elas normalmente são posicionadas sobre o teto. Este posicionamento das caixas pelo edifício pode gerar desconforto sonoro. Como no edifício n-ZEB haverá apenas um ventilador central para suprir cada pavimento, e não um ventilador para cada caixa VAV, o desconforto sonoro devido a estes equipamentos não será um grande problema.

3.5 O SISTEMA APLICADO AO MODELO PROPOSTO

O sistema de volume de ar variável (VAV) proposto deverá trabalhar em conjunto com o sistema de expansão indireta, otimizando sua operação. O sistema de VAV tem o objetivo não só de gerar conforto térmico aos ocupantes do ambiente, mas também de garantir que haverá o menor gasto energético possível para que tal requisito seja atendido. Para isto, é necessário que o sistema seja bem modelado para atender a demanda térmica do edifício.

No trabalho de Teixeira (2015) foram propostos os cálculos de carga térmica e seus respectivos gráficos para o edifício n-ZEB. Estes cálculos foram utilizados para que o melhor sistema de climatização fosse utilizado para o projeto: um sistema híbrido de resfriamento evaporativo (que será explicado no próximo capítulo) e de expansão indireta com emprego de *chillers* de condensação a ar. Tal sistema será otimizado por uma estratégia de *free cooling* e o sistema VAV.

Além do modelamento exposto por Teixeira (2015), em seu trabalho o autor demonstrou que a demanda térmica do edifício será suprida garantindo conforto térmico durante todas as horas do dia em qualquer época do ano. Contudo, este sistema pode ser ainda mais melhorado utilizando-se técnicas de controle e automação para integrar todo o sistema ao ambiente e seus ocupantes de forma satisfatória. Com o uso dos sensores e atuadores descritos nas seções anteriores, será proposto um projeto para a execução deste sistema no edifício n-ZEB.

Basicamente, será utilizada pelo menos uma caixa de VAV por ambiente, dependendo das dimensões do ambiente: para ambientes grandes como auditórios pode haver a necessidade de se utilizar mais de uma caixa de VAV. Para cada caixa haverá um *damper*, um sistema de sensores de fluxo de ar, um sensor de pressão que será colocado em um ponto mediano do duto de ventilação em cada pavimento, um sensor de temperatura que será colocado no interior do ambiente, quatro sensores de temperatura que serão colocados externamente em cada canto do edifício e um sistema de controle compartilhado entre todo o edifício.

Grande parte destes sensores será compartilhada para o controle do sistema de *chillers* (resfriamento por expansão indireta com *chiller* a ar descrito no capítulo anterior) e do sistema de VAV, já que estes dois sistemas devem trabalhar juntos para garantir a climatização durante todo o período de ocupação.

O suprimento e climatização do ar serão feitos por *fan-coils* (um por pavimento), e o sistema de resfriamento da água será feito como descrito no capítulo 2.

Para garantir o uso do *free cooling* e a recirculação de ar, haverá três *dampers* especialmente designados para permitir a entrada e saída do ar externo em cada pavimento: *damper* de *free cooling*, *damper* de retorno e *damper* barométrico. O controle destes *dampers* será feito de acordo com os sensores de temperatura, presença, de CO₂ e com o cronograma de horários. Para garantir a entrada e saída do ar externo pelos *dampers*, serão utilizados os ventiladores dos *fan-coils*.

Todas as estratégias citadas anteriormente serão utilizadas para que a climatização seja feita com o menor gasto energético possível. Nos próximos capítulos serão mostrados detalhes de como serão feitas as programações, bem as estratégias de controle que as comporão. Será exposto também os softwares e hardwares utilizados, bem como simulações demonstrando os resultados destas programações.

4 SISTEMA DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO COMO INSTRUMENTO DE CLIMATIZAÇÃO PELA UMIDIFICAÇÃO

Este capítulo se propõe à exposição das características e detalhes de um sistema de resfriamento evaporativo para a implementação do controle deste sistema no edifício n-ZEB.

4.1 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

O resfriamento evaporativo funciona através de processos induzidos nos quais a água e o ar são os fluidos utilizados. O procedimento acontece quando a água evapora e, por ela, é transmitido um fluxo de ar que tem uma queda de temperatura devido às trocas de calor entre os fluidos.

É largamente utilizado em vários processos como torres de resfriamento de água e condensadores evaporativos. Entretanto, este tipo de sistema ainda é pouco explorado e difundido para o conforto térmico humano. Ele é aplicável em áreas com grandes quantidades de pessoas, áreas industriais, minas, abrigos de animais, e no armazenamento de produtos como frutas e carnes.

O resfriamento evaporativo corresponde ao último mecanismo do sistema de resfriamento híbrido proposto para o edifício n-ZEB e participará juntamente com o sistema de expansão indireta com *chiller* com condensação a ar (melhorado pelos sistemas de VAV e *free cooling*),

Basicamente, o resfriamento evaporativo pode ser direto ou indireto. A seguir será feita uma explicação do funcionamento de cada um destes sistemas.

4.1.1 Resfriamento evaporativo indireto

O resfriamento evaporativo indireto usa as vantagens do sistema de resfriamento por evaporação para, através da troca de calor, resfriar o ar ambiente.

Nesta classificação, o ar relativamente seco é mantido separado do ar úmido. Assim, o ar a ser climatizado não entra em contato com as partículas de água, de forma que não há aumento na umidade relativa do ar neste caso.

O ar que será utilizado para resfriar o ambiente (que chamamos de ar primário), troca calor com um sistema isolado, composto por ar e água, onde ocorre a evaporação. Portanto, o ar secundário é responsável por passar a água do estado líquido para o gasoso, absorvendo calor do ar primário. Como o ar primário perde calor, ele se refrigera sem entrar em contato com o ar úmido e é enviado ao ambiente para realizar a climatização.

A Figura 4.1 mostra uma configuração comum de resfriamento evaporativo indireto que faz uso de um trocador de calor.

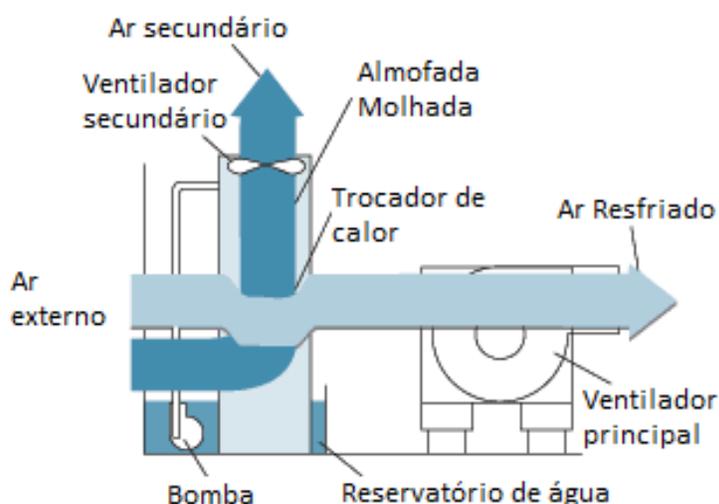


Figura 4.1 Sistema de resfriamento evaporativo indireto. (Kinney, 2004)

Neste tipo de equipamento, uma pequena bomba conduz a água para uma almofada (esponja) que fica dentro do tubo de ar secundário. É comum utilizar serragem, celulose tratada, fibra de vidro ou plástico no lugar da almofada, de acordo com a eficiência do material para cada tipo de situação.

O ventilador secundário joga o ar secundário pela almofada molhada de forma que a água evapore no ar. O ventilador principal conduz o ar externo por um trocador de calor. No trocador de calor, o ar secundário (onde a água evapora) absorve calor do ar primário (vindo da região externa) para que seja realizada a evaporação. O ar primário é então resfriado e levado ao ambiente a ser climatizado. A água que escorre da almofada é captada por um reservatório e reutilizada no sistema.

Como dito anteriormente, neste tipo de resfriamento evaporativo não há contato entre o ar primário e o secundário, e o ar que é levado para fazer a climatização do ambiente (ar primário) não tem sua humidade relativa aumentada.

Como Brasília é uma cidade bastante seca e o sistema de expansão indireta com *chiller* a ar trabalha de forma mais eficiente na refrigeração do ar sem umedecê-lo, o sistema de resfriamento evaporativo indireto não será utilizado no edifício n-ZEB. Para o edifício, Teixeira (2015) escolheu o sistema de resfriamento evaporativo direto, que será mostrado a seguir.

4.1.2 Resfriamento evaporativo direto

O resfriamento evaporativo direto usa um ventilador para empurrar o ar por uma esponja (pode-se utilizar serragem, celulose tratada, fibra de vidro ou plástico) que é mantida constantemente úmida por um sistema de bombeamento. A água normalmente é enviada via tubos e a esponja, além de resfriar e umedecer o ar, também o filtra, eliminando impurezas suspensas que seriam enviadas ao ambiente.

Como no sistema de resfriamento evaporativo indireto, existe um reservatório de captação para a água que escorre pela esponja. O reservatório recebe também água do sistema hídrico, e seu nível é controlado por uma válvula de fluxo. A bomba utiliza a água deste reservatório para umedecer a esponja.

Neste caso há contato direto entre o ar que vai ser enviado ao ambiente e a água que vai evaporar, e por isso este processo é chamado de direto. A grande vantagem deste sistema é que o ar recebe partículas de vapor de água e, desta forma, eleva a umidade relativa no ambiente climatizado. Pensando nisso, e no fato que o Distrito Federal tem um dos períodos de seca mais severos do Brasil, Teixeira (2015) optou por utilizar este sistema juntamente com o resfriamento por expansão indireta com *chiller* a ar.

A Figura 4.2 ilustra um sistema de resfriamento evaporativo por expansão direta. Quanto mais lento o ar passar pela esponja, mais tempo ficará exposto à água e desta forma alcançará melhor resfriamento e maior umidade relativa.

Este tipo de equipamento, quando comparado ao sistema de resfriamento evaporativo indireto, tem a vantagem de utilizar apenas um ventilador (e não dois) e de aumentar a umidade relativa do ar que será transmitido ao ambiente. Assim, há maior economia de energia e aumento no conforto interno para os ocupantes.

É importante ressaltar que, para o projeto do sistema de controle, é pressuposto que o meio de contato entre a água e o ar (esponja, por exemplo) foi devidamente escolhido para

atender as necessidades do edifício. Pressupõe-se também que o tamanho do meio (esponja ou algum dos materiais citados) e dos dutos foi previamente definido.

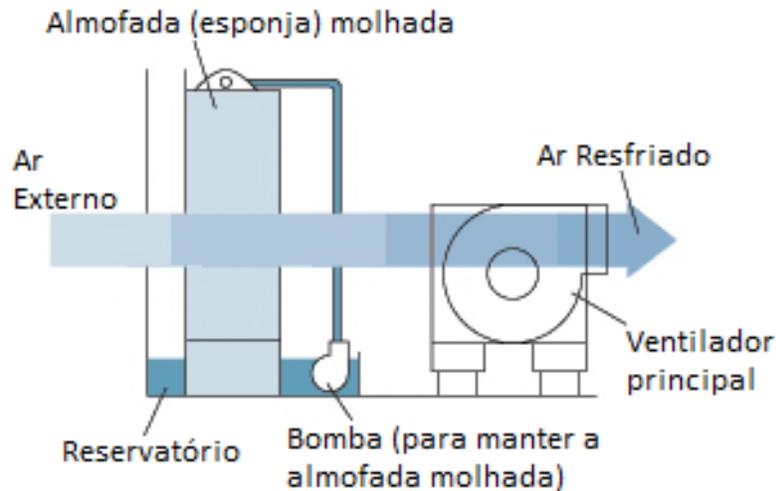


Figura 4.2 Sistema de resfriamento evaporativo direto. (Kinney, 2004)

É muito importante que o meio de contato entre a água e o ar (esponja, serragem, celulose tratada, fibra de vidro ou plástico) seja eficiente nesse tipo de sistema. Isto significa que o meio deve permitir o melhor resfriamento possível, minimizando a queda de pressão para, desta forma, aumentar a economia de energia pelo ventilador principal. A Figura 4.3 mostra um meio de troca moderno para um sistema evaporativo direto.

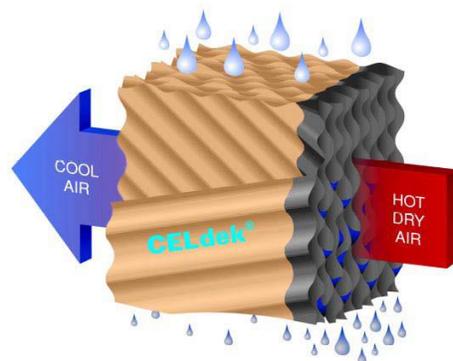


Figura 4.3 Meio moderno de contato entre a água e o ar para um sistema evaporativo direto. (Kinney, 2004)

Um meio bem projetado filtra a corrente de ar e se limpa automaticamente. Esta limpeza é feita com o gotejamento de água, mas não garante que o meio ficará totalmente limpo durante toda a vida útil do equipamento. Portanto, este equipamento deve ser durável e de fácil substituição para que possa ser removido caso se danifique ou acumule excesso de sujeira.

Sistemas modernos de resfriamento evaporativo direto utilizam uma esponja (ou outro dos meios de troca já mencionados) de alta performance para baixo fluxo de ar. Desta forma eles maximizam a transferência de água no estado gasoso para o ar, que aumenta a eficiência do resfriamento e possibilita níveis mais altos de umidificação. Além disso, nesse caso a potência do ventilador não precisa ser muito elevada, o que garante maior economia de energia.

No resfriamento evaporativo direto, os efeitos da refrigeração dependem da velocidade do fluxo de ar, da qualidade e condições do meio de troca e da diferença entre a temperatura de bulbo seco e úmido. A seguir, explica-se o que é a temperatura de bulbo seco e úmido e sua influência na escolha do sistema.

A temperatura do ar medida com um termômetro cujo elemento sensor é seco é conhecida como temperatura de bulbo seco. Ao contrário, quando a temperatura é medida por um termômetro cujo elemento sensor está encoberto por um pavio molhado onde o ar é soprado, ela é conhecida como temperatura de bulbo úmido.

Se a umidade relativa é igual a 100%, não há diferença entre as temperaturas de bulbo úmido e seco. Conforme a umidade relativa cai, a temperatura de bulbo úmido cai em relação à temperatura de bulbo seco.

Em locais onde a umidade relativa do ar é muito baixa, esta diferença é substancial. Por exemplo, com uma humidade relativa de 10%, a temperatura de bulbo seco em certa região fica em torno de 32.2 graus Celsius, enquanto a temperatura de bulbo úmido fica em torno de 14.4 graus Celsius, uma diferença de 17.8 graus Celsius (Kinney, 2004). Isto significa que, em Brasília, por exemplo, nas épocas em que a humidade relativa do ar é muito baixa, o sistema de climatização por evaporação direta pode reduzir drasticamente a temperatura de bulbo úmido, trazendo o conforto térmico para os ocupantes.

Com isto, o sistema de resfriamento evaporativo direto será usado com o objetivo não só de reduzir os gastos energéticos como de garantir maior conforto térmico principalmente nas épocas mais secas do ano. Este sistema irá trabalhar em conjunto com o sistema de resfriamento por expansão indireta com *chiller* a ar através do sistema de VAV e do *free cooling*.

4.2 RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO ADOTADO NO EDIFÍCIO DE ESTUDO

Como foi descrito nos dois capítulos anteriores, o edifício n-ZEB terá um sistema de climatização por expansão indireta com *chiller* a ar otimizado por um sistema de VAV e *free cooling*. Este sistema por si só tem capacidade suficiente para gerar conforto térmico nos ambientes internos do prédio durante todas as épocas do ano.

Entretanto, o objetivo de uma edificação como o n-ZEB é que se tenha o menor gasto energético possível para que se alcance o conforto térmico dos ocupantes. Mesmo que o sistema de refrigeração por expansão indireta com *chiller* a ar tenha capacidade para climatizar o edifício, o gasto energético que este sistema geraria caso fosse utilizado sozinho ou sem as estratégias descritas no capítulo anterior para aumentar a economia (Ligamento e desligamento ótimo, otimização da pressão de ventilação, Identificação da *Rogue Zones* e a Otimização da ventilação com *free cooling*) seria muito elevado.

Por isso, além de optar por todas as estratégias descritas, será utilizado também um sistema híbrido de refrigeração, onde a expansão indireta com *chiller* a ar e o resfriamento evaporativo direto serão utilizados em conjunto. Será possível escolher as melhores situações climáticas para se determinar quando os sistemas serão utilizados individualmente ou em conjunto. No caso, haverá um resfriador evaporativo para cada caixa de VAV. O esquema de funcionamento para o controle será mostrado nos próximos tópicos

Um bom exemplo de aplicação para se utilizar o sistema de resfriamento evaporativo é quando o ar estiver com umidade relativa muito baixa e a temperatura do ambiente externo não for muito elevada (em junho e julho durante o inverno, por exemplo). Desta forma, o sistema não terá que diminuir a temperatura de forma excessiva (o que seria inviável para o resfriamento evaporativo) e ainda contribuiria para elevar a porcentagem de vapor de água no ar. Neste caso, o ideal seria utilizar o resfriamento evaporativo aliado ao *free cooling* para captar o ar frio externo e seco. Assim, o ar frio seria enviado para o ambiente interno através dos ventiladores dos *fan-coils* de cada pavimento e então seria umidificado pelos resfriadores evaporativos.

Caso a temperatura do ambiente externo esteja elevada e a umidade relativa do ar esteja alta (por exemplo, na primavera e verão, entre outubro e março), a escolha ideal será utilizar o sistema com *chiller*. Este sistema irá baixar a temperatura de forma considerável e não aumentará a umidade relativa do ar, mantendo assim o conforto térmico.

Se a temperatura do ambiente externo estiver elevada e a umidade relativa do ar estiver baixa (normalmente nos meses de maio a setembro) é ideal que se use os dois sistemas simultaneamente. O resfriamento por expansão indireta com *chiller* de condensação a ar reduz a temperatura até a zona de conforto e o sistema de resfriamento evaporativo direto aumenta a umidade relativa do ar. Nesta situação o ar externo não entrará no edifício, o que será feito na verdade é uma umidificação do ar resfriado pelo sistema de água gelada, de forma a gerar maior conforto térmico. Para garantir que o ar não ficará com excesso de umidade, os sensores de umidade estarão monitorando a situação do ar, e desta forma quando certa porcentagem de umidade for atingida (*setpoint*), os resfriadores evaporativos serão desativados.

É importante ressaltar, que no caso do edifício n-ZEB, o sistema de resfriamento evaporativo direto não vai ter um ventilador principal individual. O fluxo de ar vai ser garantido pelo ventilador do *fan-coil* de cada pavimento. Contudo, caso no futuro se deseje instalar um ventilador individual para cada resfriador evaporativo, isso poderá ser feito facilmente sem causar grandes alterações no sistema como um todo ou em sua programação.

Já foram discutidos vários sensores e atuadores que serão utilizados no sistema de climatização. Dampers, *chillers*, bombas de água (para o sistema de água gelada), sensores de temperatura, sensores de pressão, sensores de presença, sensores de CO₂, sensores de fluxo de ar e os ventiladores com as serpentinas de resfriamento (*fan-coil*) são os principais componentes discutidos até agora.

Com o novo sistema de resfriamento evaporativo direto, alguns outros sensores e atuadores serão introduzidos para que os mecanismos possam ser bem controlados. Para isto, uma nova estratégia deverá ser feita para os dutos de ventilação por onde o ar entra nos ambientes internos.

4.2.1 Dampers de saída

Para que se possa escolher se o sistema de resfriamento evaporativo vai ser utilizado ou não, será utilizado um sistema de *dampers*. Eles serão denominados *dampers* de saída e tem a função de permitir que o ar passe pelo sistema de resfriamento evaporativo ou não.

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram como estes *dampers* irão funcionar. Na fig 4.4, o sistema de resfriamento evaporativo não é utilizado e, portanto não precisa ser ativado. Neste modo de operação, o *damper* de saída evaporativo é fechado e o *damper* de saída comum é aberto. Assim, não permitem que o ar passe pelo resfriador, e então o ar sai diretamente da caixa VAV

para o ambiente a ser climatizado. Nesta situação (sem uso do resfriamento evaporativo), o processo funciona exatamente como explicado no capítulo anterior (Sistema de VAV).

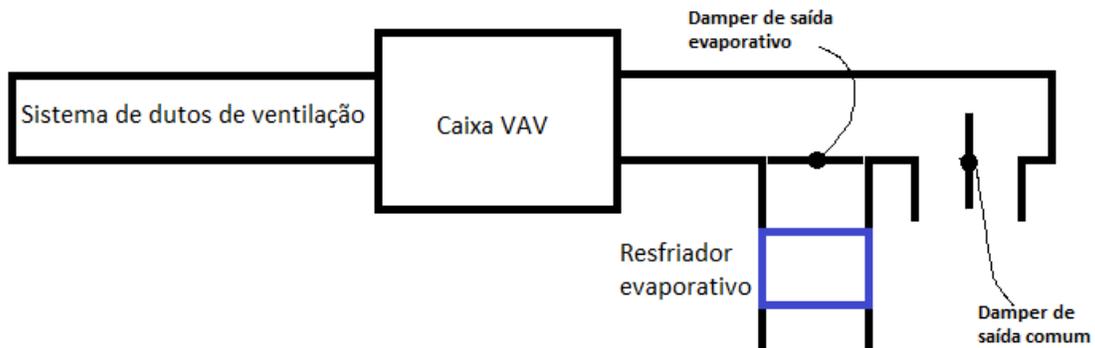


Figura 4.4 Funcionamento dos *dampers* de saída sem utilizar o resfriamento evaporativo

No caso da Fig 4.5, o sistema de resfriamento evaporativo é utilizado. Nesta situação, o *dampers* de saída evaporativo abre e o comum fecha, de forma a permitir passagem de ar apenas para o resfriador evaporativo. Portanto, o ar entrará em contato com a esponja molhada (ou algum dos outros meios de contato entre a água e o ar já mencionados), e será umidificado e resfriado.

Neste modo de operação, o sistema funciona exatamente como descrito no capítulo anterior até chegar à saída da caixa VAV. Ao sair da caixa, o ar vai passar pelo resfriador evaporativo em vez de ir diretamente ao ambiente a ser climatizado. Portanto, neste caso o resfriador evaporativo deve ser ativado.

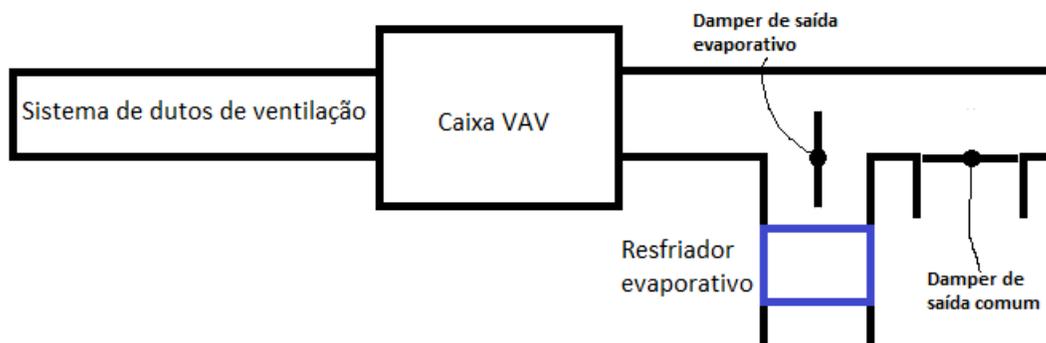


Figura 4.5 Funcionamento dos *dampers* de saída utilizando o resfriamento evaporativo

É importante notar que o *dampers* da caixa de VAV vai funcionar exatamente como previsto e será totalmente independente dos *dampers* de saída. Além disso, os dois *dampers* de saída serão de modo único (aberto ou fechado), e enquanto um *dampers* estiver fechado o outro necessariamente deverá estar aberto. Portanto, o ar sempre terá um meio de passagem pelos *dampers* de saída e, caso o sistema de ventilação precise ser completamente fechado ou diminuído, será o *dampers* da caixa de VAV que irá desempenhar esta função.

4.2.2 Sensores de umidade

Para determinar se o sistema de resfriamento evaporativo vai ser utilizado ou não, dois fatores são importantes: a temperatura e a umidade. Os sensores de temperatura citados anteriormente também serão utilizados para este sistema, de forma que não é necessário adicionar mais sensores de temperatura.

Contudo, será necessário colocar sensores de umidade nos ambientes internos. Da mesma forma que os sensores de temperatura, haverá um sensor de umidade por ambiente resfriado e estes sensores serão colocados juntamente com os de temperatura para facilitar o processo (será possível até mesmo utilizar, em cada ambiente, um único sensor que meça a temperatura e a umidade simultaneamente).

4.2.3 Bomba de água

Ao contrário das bombas primárias e secundárias responsáveis pelo fluxo de água no sistema de água gelada do resfriamento por expansão indireta com *chiller* com condensação a ar, as bombas que levam a água do reservatório até a esponja são muito menores e menos potentes. Na verdade, estas bombas deverão impulsionar a água a uma distância bem pequena, de no máximo 1 metro (entre o reservatório e a parte de cima da esponja), e por isso seu gasto energético é mínimo.

No caso do sistema controlado por este projeto, é sugerido que a bomba tenha apenas duas opções de controle: ligado ou desligado. É com base nesta sugestão que será desenvolvida a programação do sistema.

É preciso que haja uma bomba por resfriador evaporativo para o funcionamento do sistema. Então, como haverá o mesmo número de resfriadores e caixas de VAV, o número de bombas também equivale à quantidade destes equipamentos no edifício. Pode parecer muito,

mas como o gasto energético destas pequenas bombas é muito baixo, não será motivo de preocupação para a economia de energia do prédio.

4.2.4 Válvula de boia

Estas válvulas têm a função de fechar a tubulação que abastece o reservatório com água quanto este estiver no nível adequado. Caso o nível de água do reservatório esteja baixo, a boia da válvula irá baixar e permitir que a água escoe até o recipiente. Caso o nível da água esteja elevado, a boia sobe e fecha a saída da tubulação

A válvula de boia funciona de forma autônoma e totalmente mecânica, sendo que não é necessário incluí-la na programação do sistema. Desta forma, uma vez instaladas, as válvulas de boia do edifício irão funcionar independentes de qualquer variável do sistema.

4.3 SISTEMA EVAPORATIVO COMO MEIO DE ECONOMIA E SUSTENTABILIDADE

Atualmente existem por volta de 20 milhões de resfriadores evaporativos residenciais em uso pelo mundo. Eles evitam a emissão de 13 bilhões de kg de CO₂ e economizam cerca de 60 milhões de barris de petróleo por ano.

Somente o mercado de resfriadores evaporativos nos Estados Unidos movimentava 180 milhões de dólares todos os anos, e possui mais de 4 milhões de unidades instaladas. O custo destes equipamentos é bastante reduzido quando comparado ao custo de equipamentos de refrigeração mecânica mais complexos.

Os custos de operação do sistema de resfriamento evaporativo direto são reduzidos em 25% a 40% se comparados a sistemas mecânicos de refrigeração. Em um sistema híbrido como o proposto para o edifício n-ZEB, pode haver uma economia entre 40% e 50% dependendo da época do ano.

O sistema de resfriamento evaporativo vai funcionar apenas em certas situações, de forma que nem sempre estará ligado. Além disso, por não possuir ventiladores individuais para cada resfriador, os únicos gastos energéticos provindos da ativação destes equipamentos serão as bombas de água e a mudança de posição dos *dampers* de saída. Ambos os equipamentos não gastam uma quantidade relevante de energia, e por isso o gasto energético não será uma preocupação para o resfriamento evaporativo no edifício n-ZEB.

4.4 CONCLUSÃO SOBRE A ESCOLHA DO SISTEMA EVAPORATIVO

Utilizar um sistema evaporativo pode trazer muitos resultados que garantirão uma grande economia de energia no edifício n-ZEB. Além disso, é possível escolher os momentos apropriados para se utilizar o resfriamento evaporativo ou o resfriamento por expansão indireta com *chiller* a ar.

Quando a temperatura e a umidade estiverem baixas, por exemplo, é uma boa situação para se usar o sistema de resfriamento evaporativo para poupar energia. Neste caso pode-se usar inclusive o *free cooling* em conjunto com o resfriamento evaporativo. O ar frio e seco entra no edifício, é umidificado pelos resfriadores evaporativos e chega ao ambiente frio e úmido, gerando conforto térmico.

Já nos casos em que a temperatura estiver muito elevada, pode-se utilizar o resfriamento com o sistema de água gelada (expansão indireta com *chiller* a ar) ou ainda uma combinação dos dois sistemas (resfriamento por expansão indireta com *chiller* a ar e resfriamento evaporativo).

Apesar de gerar uma economia muito grande, o sistema de resfriamento evaporativo depende de um processo de controle e automação eficientes para funcionar em conjunto com os outros sistemas (sistema híbrido).

Quando se planeja projetar um sistema de controle, é muito importante ter conhecimento do sistema que se deseja controlar. Por isso, foi apresentado cada sistema individualmente, seu funcionamento básico, seus sensores e atuadores e a forma como se pretende desenvolver seu controle.

No próximo capítulo, será desenvolvido o sistema de controle em si, de forma que o leitor terá acesso à lógica de programação, ao projeto dos sensores no edifício e às especificações dos softwares e hardwares utilizados para o projeto. Por fim pretende-se que o leitor tenha uma boa noção de como será feito o controle do edifício n-ZEB baseado nas informações disponibilizadas até agora e nos projetos de programação e de distribuição dos sensores que serão apresentados daqui para frente.

5 CONTROLE E AUTOMAÇÃO ADOTADOS PARA OS SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO

Este capítulo tem o objetivo de explicar, no contexto da proposta do presente trabalho, como será feito o controle e automação de cada um dos sistemas e seus respectivos equipamentos mostrados nos capítulos anteriores.

5.1 REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE ADOTADO

As análises e estudos desenvolvidos nos capítulos anteriores foram feitos para que fosse possível desenvolver uma representação do sistema de controle do edifício n-ZEB. Esta representação servirá de embasamento para a instalação, programação e *startup* do sistema de controle dos equipamentos de climatização para o edifício.

A ideia inicial era desenvolver a programação do sistema na linguagem *ladder* de forma a deixá-lo pronto para ser utilizado assim que o sistema fosse instalado. Contudo, diversas fases de projeto do edifício ainda estão pendentes e, por isso, a programação teria que ser feita baseada em suposições de diversos elementos do projeto como a marca e modelo dos equipamentos e dimensionamento de tubulação. Para solucionar o problema, foi decidido realizar o projeto em um nível mais alto: com a utilização de diagramas de fluxos, ou fluxogramas.

Todos os fluxogramas apresentados neste capítulo (Fig 5.2 à Fig 5.14) são de autoria do autor do presente projeto e foram feitos para atender as estratégias aqui discutidas.

5.1.1 Função e funcionamento de um fluxograma

Um fluxograma (*flowchart*) é um diagrama que tem a função de representar processos, operações ou fluxos de tarefas. O fluxograma representa um processo dinâmico, que gera resultados momentâneos ou não, e pode se alterar durante a execução do processo.

Devido a sua simplicidade e a facilidade de serem utilizados, muitos programadores utilizam fluxogramas para desenvolver algoritmos complexos antes de iniciarem a programação propriamente dita. A utilização do fluxograma como ferramenta de desenvolvimento de programas ajuda o programador a organizar suas ideias e ter uma noção mais clara da lógica

que está desenvolvendo. Quando são usados para desenvolvimento de programas, os fluxogramas possuem algumas representações próprias da programação.

Um fluxograma sempre possui um início, um fluxo, e um fim. O mais importante neste tipo de diagrama é que os processos e ações sejam facilmente entendidos. Por isso, é importante utilizar textos claros e sucintos, e símbolos simples e de fácil visualização. Algumas regras básicas de construção de fluxogramas serão mostradas a seguir:

1. As linhas de fluxo indicam o sentido do processo e podem conter comentários sobre a transferência de informações e variáveis.
2. Todos os símbolos apresentados devem estar conectados por linhas de fluxo.
3. Todo fluxograma deve possuir somente um INÍCIO
4. Ao símbolo de início não pode chegar nenhuma linha de fluxo
5. Aos símbolos de fim podem chegar várias linhas de fluxo, mas não deve sair nenhuma linha.
6. Blocos de decisão deverão possuir somente duas saídas, uma SIM ou NÃO

Essas regras devem ser seguidas sempre que se trabalhe com fluxogramas de qualquer tipo.

Para a construção de fluxogramas, é necessário que se utilizem símbolos (figuras geométricas) que contém cada tipo de informação gerada no fluxograma. A Figura 5.1 apresenta os símbolos que serão utilizados nos fluxogramas, e serão utilizados mais a frente neste capítulo. Existem diversos outros símbolos que podem ser usados em fluxogramas, porém, para este trabalho, foram usados somente os que serão mostrados na figura.

Existem diversas aplicações para um mesmo símbolo, dependendo de qual sistema um fluxograma irá representar (funcionamento de máquinas, programa de computador, processo de produção etc.). São funções padronizadas, por isso a explicação das aplicações dos símbolos que serão apresentadas a seguir são voltadas exclusivamente para o projeto do sistema de controle para o edifício n-ZEB.

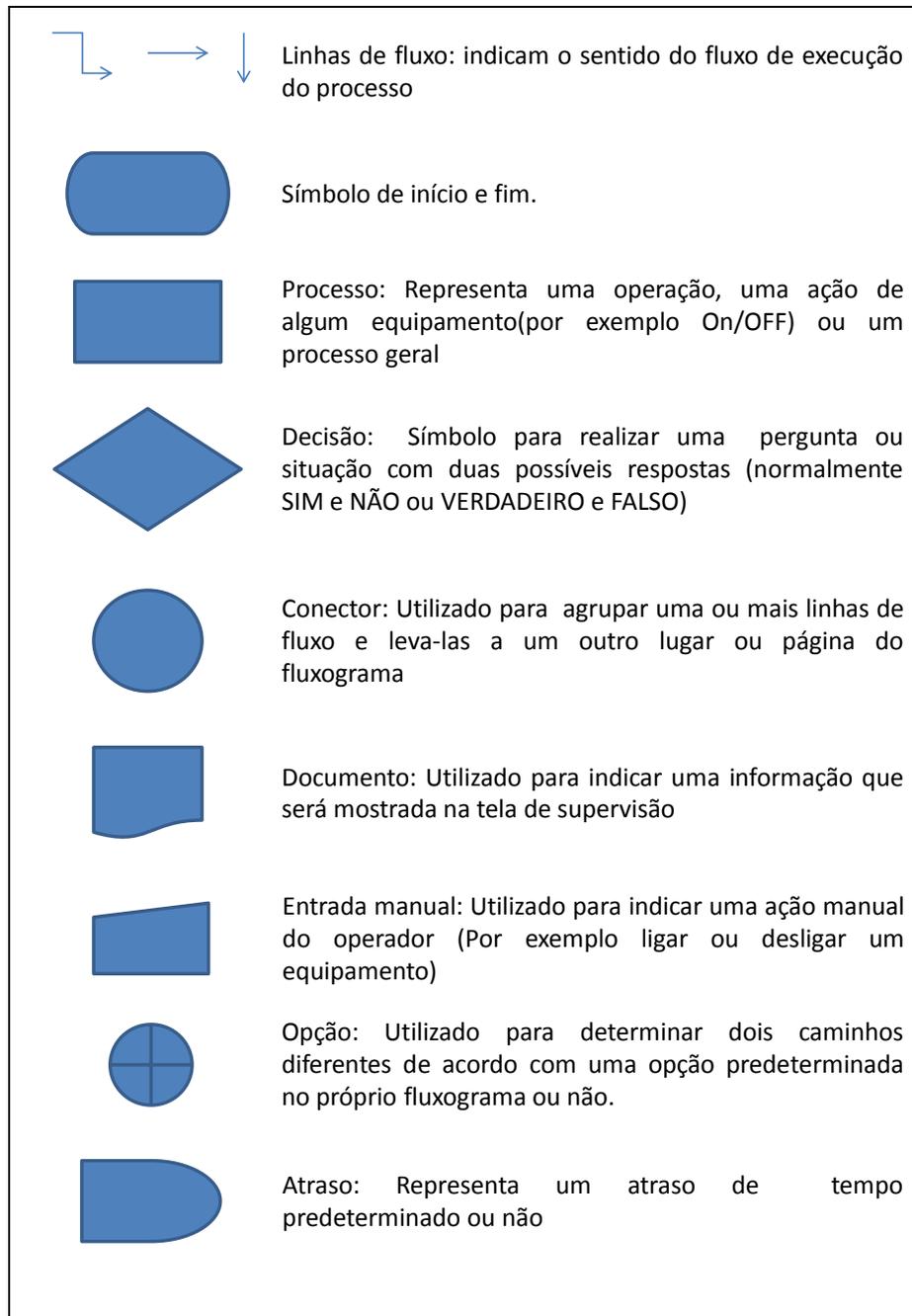


Figura 5.1 Simbologia utilizada para os fluxogramas do sistema de controle do edifício n-ZEB

5.1.2 Representação do sistema de controle por meio de fluxogramas

Nos próximos tópicos serão descritas e apresentadas todas as lógicas de programação de controle e automação para todos os sistemas que foram apresentados nos três capítulos anteriores. Elas serão apresentadas em fluxogramas para facilitar o entendimento dos

processos e aplicações envolvidos. As lógicas são baseadas nas estratégias e especificações feitas anteriormente para o edifício n-ZEB, e poderão ser usadas em qualquer Programadora Lógica Controlável (PLC) e em qualquer linguagem de programação.

Os fluxogramas usarão abreviações (TAGS) dos nomes de cada sensor ou atuador envolvido. Portanto, para que o leitor entenda o funcionamento das lógicas apresentadas é necessário que se tenha conhecimento do que cada uma destas abreviações representa. Estas informações são contempladas nas listas de pontos do sistema de controle (Apêndice II) ou na lista de símbolos no início do trabalho. É sugerido que o leitor tenha as listas de pontos ou a lista de símbolos em mãos quando for fazer a análise dos fluxogramas.

Os documentos apresentados nos apêndices foram adaptados para apresentação em folha tamanho A4. Portanto, caso sua visualização seja dificultada devido ao tamanho reduzido das fontes, é aconselhado sejam visualizados utilizando os documentos digitalizados que são apresentados junto a este trabalho em CD ou *pendrive*.

Em cada tópico será feita uma explicação do funcionamento do sistema de controle e do sistema de segurança do equipamento ou conjunto de equipamentos de cada um dos três principais sistemas (Sistema de Climatização por Expansão Indireta com *Chiller* de Condensação a Ar, Sistema de Volume de Ar Variável, Sistema de Resfriamento Evaporativo Direto). Seguido desta explicação será apresentado o fluxograma representativo do respectivo processo descrito. É de fundamental importância que seja lida a explicação para o entendimento do fluxograma, e também que se tenha em mãos a lista de pontos com as abreviações (TAGS), que é apresentada no Apêndice II ou na lista de símbolos.

A pesar de serem mostrados separadamente, todos os sistemas funcionam em conjunto. A comunicação entre eles é feita principalmente através dos sensores que são compartilhados entre os diversos equipamentos. Portanto, mesmo que cada um dos fluxogramas apresente início e fim, as suas lógicas são incorporadas às lógicas dos outros fluxogramas pelas informações recebidas dos sensores e enviadas aos atuadores.

Assim, a programação do sistema foi elaborada para ser feita individualmente, contudo ela funciona como um todo, controlando todos os sistemas para agirem simultaneamente e harmoniosamente, de forma a trazer o maior conforto térmico possível a cada ambiente climatizado do edifício n-ZEB.

5.2 CONTROLE DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR EXPANSÃO INDIRETA COM *CHILLER* DE CONDENSAÇÃO A AR

A seguir serão mostrados os procedimentos de controle que serão utilizados para os componentes deste sistema de refrigeração. Esses procedimentos serão utilizados para que possa haver melhor entendimento nos fluxogramas que serão apresentados em seguida. Reitera-se, mais uma vez, a necessidade de se utilizar a lista de pontos apresentada no Apêndice II ou a lista de símbolos no início do trabalho para melhor entendimento dos fluxogramas. As abreviações das variáveis de *setpoint* não são contempladas na lista de pontos por serem variáveis virtuais. Contudo, estas abreviações serão expostas na lista de símbolos no início do trabalho e nas explicações dos sistemas de controle, antes dos fluxogramas.

5.2.1 Lógicas e estratégias de controle para as bombas primárias

Haverá exatamente o mesmo número de compressores e de bombas (oito), portanto estas devem ser corretamente dimensionadas para bombear a quantidade de água necessária para cada compressor dos *chillers*.

Consideramos neste trabalho que este dimensionamento será feito pela equipe responsável pelo projeto de ar condicionado. Como o objetivo aqui é projetar o sistema de controle, supomos que o dimensionamento já tenha sido feito conforme suposto.

As bombas primárias (de ação on/off) serão ativadas de acordo com a ativação dos compressores dos *chillers* (que serão mostrados a seguir). Como são oito bombas, cada uma será representada pela sigla BP, de bomba primária, seguida pelo número da bomba (por exemplo, BP1 representa a bomba primária 1). Logo, se houver apenas um compressor ligado, apenas a bomba BP1 será ligada. Caso haja 2, as bombas BP1 e BP2 serão ligadas, e assim sucessivamente.

Portanto, o controle de bombas primárias será feito exclusivamente pela ativação dos compressores, e quanto mais compressores em funcionamento, mais bombas estarão ligadas. Para garantir um revezamento, as bombas sempre estarão vinculadas aos mesmos compressores. Desta forma, BP1 sempre será ligada ao compressor A1, BP2 ao A2, BP3 ao A3, BP4 ao A4, BP5 ao B1 BP6 ao B2, BP7 ao B3 e BP8 ao B4. Com esta estratégia, o revezamento que será feito nos compressores, (explicado no próximo tópico) vai funcionar

também para bombas primárias, evitando uma lógica individual para a programação e facilitando na manutenção do equipamento e na supervisão do sistema. Isso garante que não serão utilizadas sempre as mesmas bombas e que terão uma vida útil mais prolongada.

Como as bombas primárias só podem funcionar quando os *chillers* estiverem funcionando, o sistema de controle destas bombas só será ativado se estes equipamentos estiverem ligados.

5.2.1.1 Sistema de segurança das bombas primárias

A segurança das bombas primárias é feita através de três procedimentos:

1. Das válvulas de retenção: Tem a função de impedir que haja uma elevação de pressão nas bombas que estiverem desligadas (Olhar Fig 2.7). Por exemplo, se 3 bombas estiverem ligadas e 5 desligadas, se não houvesse as válvulas de retenção a água poderia voltar pelas 5 bombas desligadas. Estas válvulas trabalham de forma mecânica, autônoma e automática, e por isso não necessitam estar nas lógicas de programação.
2. Dos relés de sobrecarga das bombas. Estes relés (um para cada bomba) ficarão em constante monitoramento das bombas, e caso estejam em modo ligado (ON), significa que há algum problema com a bomba monitorada por aquele relé. Estes relés estarão presentes na programação e devem desligar as bombas caso estejam em modo ligado (tem ação Normalmente Fechada, NF).
3. Da supervisão do operador: Tanto os estados das bombas primárias quanto dos relés de sobrecarga (ligado ou desligado) estarão sendo constantemente mostrados na tela para que o operador possa supervisionar o sistema no caso de alguma falha.

Além disso, se forem ligadas mais ou menos bombas do que o predeterminado pelo sistema de controle pode ocorrer uma série de problemas. Por isso não se colocou operação manual do operador para o controle das bombas primárias.

O fluxograma que será apresentado a seguir na Fig 5.2 representa o sistema de controle e sua segurança, conforme descrito anteriormente.

5.2.1.2 Fluxograma do sistema de controle para as bombas primárias

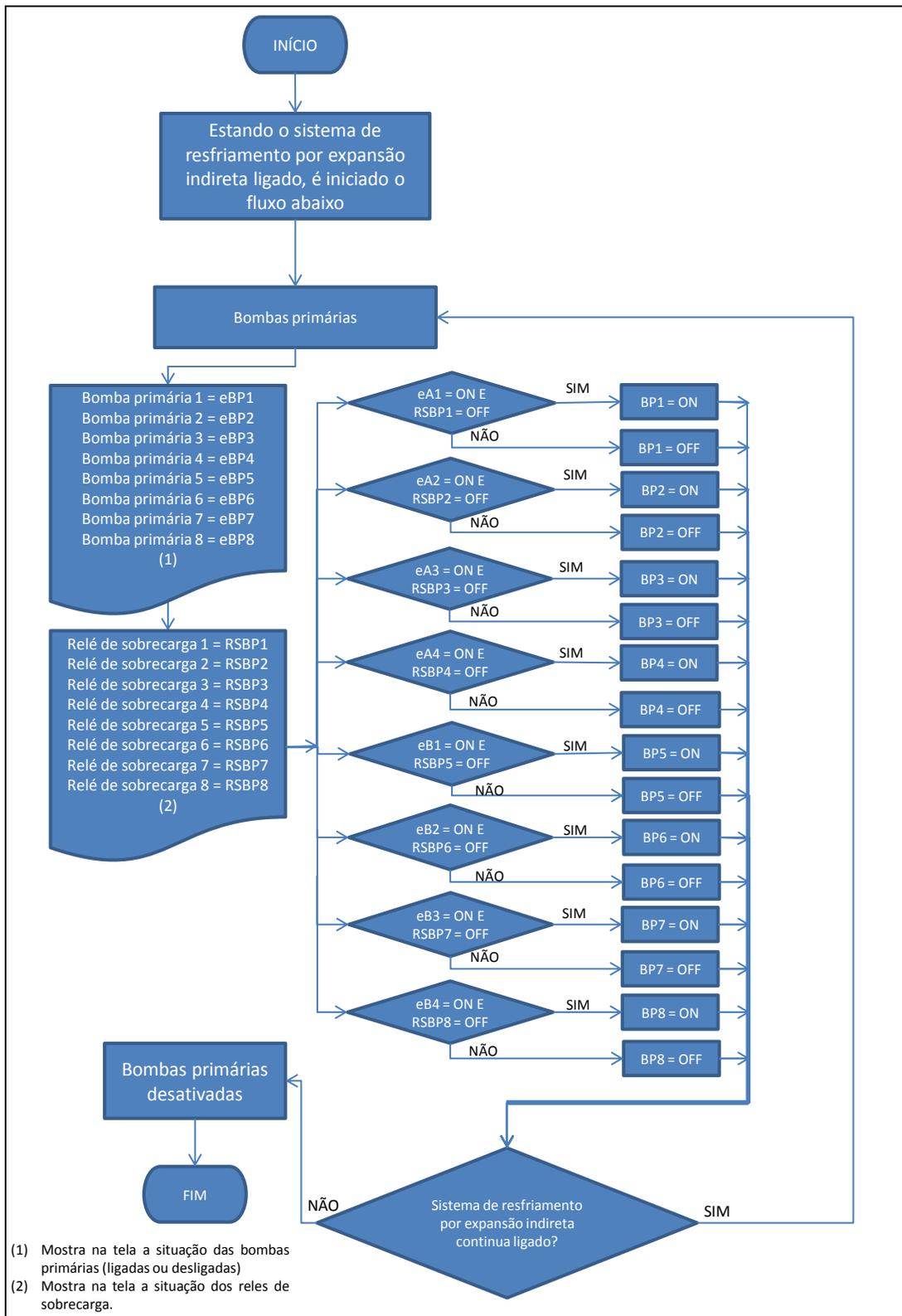


Figura 5.2 Fluxograma do sistema de controle para bombas primárias

5.2.2 Lógicas e estratégias originais de controle para os compressores dos *chillers*

Como já foi mencionado no capítulo SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO, Teixeira (2015) escolheu utilizar dois *chillers* marca *Trane* modelo CGAM52 com capacidade de 52TR dividida por 4 compressores de 13TR em cada um. Estes *chillers* deverão suprir a carga térmica do edifício que é no máximo 82TR.

Uma estratégia de sequenciamento para os compressores deve fazer com que estes equipamentos trabalhem sempre com 50% de sua carga nominal, ou na pior das hipóteses entre 25% e 75%, evitando que trabalhem com carga máxima para garantir o bom funcionamento e a durabilidade do equipamento. Lembrando que, o modelo CGAM52 possui quatro compressores que podem ser acionados individualmente. A capacidade de cada compressor é 13TR, logo a capacidade de cada *chiller* é 52 TR e o edifício tem uma demanda de 82TR.

Teixeira (2015) propôs uma estratégia de etapas para a operação dos *chillers* que será descrita a seguir. Estas etapas garantem que a margem descrita anteriormente seja atendida na maior parte do tempo.

1. Caso a demanda seja menor que 25% (20TR), apenas dois compressores de um mesmo *chiller* serão acionados, garantindo 26TR de capacidade máxima de refrigeração. Portanto, um *chiller* estará funcionando a 50% de sua capacidade e o outro estará desligado.
2. Caso a demanda seja entre 25% e 50% (entre 20 e 40TR) serão ligados dois compressores em cada *chiller*, garantindo a capacidade de refrigeração de 52TR. Assim, os dois *Chillers* estarão operando com 50% de sua capacidade.
3. Se a demanda for entre 50% e 75% (40 e 60 TR) serão ligados dois compressores de um *chiller* e três compressores do outro, garantindo 65TR. Neste caso um *chiller* opera com 75% de sua capacidade e o outro com 50%.
4. Caso a capacidade seja maior que 75% (entre 60 e 80TR), três compressores de um *chiller* e quatro compressores do outro *chiller* serão ligados. Desta forma a capacidade do equipamento é de 91TR e um *chiller* opera a 100% e o outro a 75% de sua capacidade nominal.

É importante notar que, nas estratégias descritas anteriormente, a única possibilidade em que há operação de quatro compressores em um *chiller* (ou seja, mais de 75% de carga

utilizada) é na última suposição, onde há 100% de utilização de um *chiller* e 75% do outro. Desta forma garante-se a melhor forma possível para se manter um uso moderado dos *chillers* durante a maior parte do ano.

5.2.2.1 Lógicas e estratégias de controle propostas para os compressores dos *chillers*

Visando aperfeiçoar ainda mais o sistema de controle, será utilizada uma estratégia ligeiramente diferente da proposta por Teixeira (2015). A ideia de trabalhar com grupos de compressores será mantida, contudo nesta nova estratégia, a carga térmica demandada pelo edifício será dividida por 13 (que nada mais é que a capacidade nominal de cada compressor). Assim, haverá aplicação de controle sempre que a carga térmica interna do edifício variar em múltiplos de 13.

Para facilitar o entendimento desta nova estratégia, iremos utilizar a seguinte simbologia: as letras A e B representam os dois *chillers*, e os números 1, 2, 3 e 4 representam os compressores. Por exemplo, A1 representa o compressor 1 do *chiller* A. Tendo isto em mente, o sistema irá trabalhar da seguinte forma:

1. Quando a carga for menor do que 13 TR (15,9% da demanda térmica do edifício), ou seja, menor que a capacidade de um compressor, apenas o compressor A1 será ligado.
 - a. Será feita uma lógica de programação para que se faça o revezamento dos *chillers*. Quando o sistema desligar e religar novamente, o compressor B1 será ligado. Na vez seguinte o A1 novamente e assim sucessivamente.
2. Quando a carga for entre 13 e 26 TR (entre 15,9 e 31,7% da demanda térmica do edifício), os dois compressores A1 e A2 serão ligados. Isto garante que, para cargas de até 26TR, um *chiller* pode permanecer desligado.
 - a. Além disso, será feita uma programação de controle para que os *chillers* se revezem em seu acionamento quando a carga térmica estiver nesta faixa. Por exemplo, se os compressores A1 e A2 foram acionados então, da próxima vez que o sistema for desligado e religado, os compressores B1 e B2 serão utilizados. Este revezamento garantirá maior longevidade dos *chillers* e conseqüentemente maiores economias no sistema.

3. Quando a carga estiver entre 26 e 39 TR (31,7 e 47,6% da demanda térmica do edifício), será ligado A1, A2 e B1.
 - a. Da mesma forma que no exercício anterior, neste caso também haverá um revezamento após o reinício do ciclo. Neste caso serão ligados B1, B2 e A1. (em um ciclo usa-se A1, A2 e B1 e no outro ciclo usa-se B1, B2 e A1)
4. Quando a carga estiver entre 39 e 52 TR (47,6 e 63,4% da demanda térmica do edifício), serão ligados A1, A2, B1 e B2.
5. Quando a carga estiver entre 52 e 65 TR (63,4 e 79,3% da demanda térmica do edifício), serão ligados A1, A2, A3, B1 e B2.
 - a. Também será feito o revezamento para a próxima ocorrência desta demanda do edifício. Com o revezamento serão ligados A1, A2, B1, B2 e B3.
6. Quando a carga estiver entre 65 e 78 TR (79,3% e 95,1% da demanda térmica do edifício), Serão ligados os compressores A1, A2, A3, B1, B2 e B3.
7. Caso a demanda esteja entre 78TR e 82 TR (95,1 e 100% da demanda térmica do edifício), serão ligados os compressores A1, A2, A3, A4, B1, B2 e B3.
 - a. Haverá também, para esta demanda o revezamento dos *chillers* para que não seja sempre o mesmo operando em sua capacidade nominal. No caso do revezamento serão acionados A1, A2, A3, B1, B2, B3 e B4.

Com esta estratégia será garantido que o sistema nunca opere além da capacidade necessária e, da mesma forma que na estratégia sugerida por Teixeira (2015), apenas em uma situação (item 7) haveria uso da capacidade máxima de um dos *chillers*. Esta situação ocorrerá apenas quando o edifício estiver com demanda térmica de mais de 95.1% (demanda crítica em um dia com temperaturas extremas), ou seja, ocorrerá de forma muito esporádica. Contudo, mesmo com esse uso de capacidade nominal, o revezamento garante um menor desgaste e maior longevidade do equipamento. Além disso, sempre haverá pelo menos um compressor que não estará sendo usado (e conseqüentemente uma bomba primária também). Esse compressor e essa bomba ficarão como equipamentos reserva no caso de uma falha em algum dos equipamentos em uso.

A carga térmica de qualquer ambiente varia com o tempo devido a vários fatores como insolação, número de pessoas e temperatura externa. Portanto, é necessário que o sistema de controle tenha algum meio de monitoramento para esta variação. Realizar o cálculo de carga térmica variável durante um período de tempo é inviável por causa da complexidade dos

cálculos e a impossibilidade de obtenção dos dados necessários. Para as controladoras determinarem quantos compressores serão ativados, serão utilizadas as válvulas dos *fancoils*.

As válvulas são de ação proporcional e de acordo com sua abertura haverá uma análise para a quantidade de compressores ligados. Como são três válvulas ao todo (três *fan-coils*), o sistema de controle fará uma média (M) das porcentagens de abertura e esta média será utilizada para determinar quantos compressores devem ser ligados.

Por exemplo: Se uma válvula estiver 45% aberta, a outra estiver 35% aberta e a última estiver 69% aberta, a média "M" é de 49.7%. Neste caso teremos a condição 4 da estratégia acima, e desta forma 4 compressores deverão ser ligados. Caso a abertura da última reduza para 30% por exemplo, a média "M" neste caso será de 36.7% e teremos a condição 3. Com a redução da demanda um dos compressores deverá ser desligado.

Esta estratégia baseada na abertura das válvulas é a mais indicada para fazer o controle dos *chillers*. Para o sistema não ficar se alterando constantemente a cada segundo, o ajuste do ligamento e desligamento dos compressores baseados na abertura das válvulas será feito a cada 3 minutos, ou seja, o sistema é ligado e ajusta os *chillers*, aguarda 3 minutos, então checa novamente as válvulas e ajusta novamente. Quando o sistema é desligado todo o processo se reinicia.

Os sistemas de *free cooling* e de *chillers* podem ou não funcionar em conjunto. Os dois sistemas irão operar juntos somente se a temperatura externa estiver entre duas temperaturas predeterminadas que chamaremos de temperatura inferior de *free cooling* (TIFC) e temperatura superior de *free cooling* (TSFC). Neste caso, com os dois sistemas trabalhando em conjunto, haverá uma grande economia de energia. A TIFC e TSFC devem ser selecionadas pelo projetista quando o sistema já estiver em funcionamento.

Por exemplo, digamos que a TIFC tenha sido selecionada como 15°C e a TSFC em 18°C. Quando a temperatura externa estiver entre estas temperaturas, o *free cooling* e o sistema de *chillers* irão trabalhar em conjunto. Se a temperatura cair abaixo de 15°C o *free cooling* irá trabalhar sozinho, e se subir acima de 18°C o sistema de *chillers* é que irá trabalhar sozinho.

Portanto, quando a temperatura externa estiver ente TIFC e TSFC, os dois sistemas trabalharão em conjunto para economizar energia, já que o *free cooling* não conseguiria suprir sozinho a demanda térmica do sistema. Quando a temperatura estiver abaixo de TIFC (ou seja, baixa o suficiente), significa que o *free cooling* conseguirá suprir sozinho a demanda térmica do edifício, o que gera uma grande economia de energia. E se a temperatura estiver acima de

TSFC significa que o *free cooling* só iria atrapalhar o funcionamento do sistema de resfriamento por expansão indireta com *chiller* a ar (devido a temperatura externa elevada) e, portanto, não deve ser utilizado.

Assim, na lógica de programação, o sistema de resfriamento com *chillers* deve ser desligado apenas quando a temperatura externa estiver abaixo de TIFC, caso contrário ele deve ser ligado normalmente (na lógica do *free cooling*, o sistema será desativado somente quando a temperatura estiver acima de TSFC, o que fará com que os dois sistemas funcionem simultaneamente entre TIFC e TSFC). A operação manual do sistema permanece ligada para qualquer situação de funcionamento do sistema.

A temperatura externa será medida por quatro sensores de temperatura externos. Basicamente o sistema irá excluir a temperatura mais alta e a mais baixa e tirar uma média das duas restantes, e esta será considerada a temperatura externa média. Mais detalhes deste procedimento para a temperatura externa será discutido no *free cooling*.

5.2.2.2 Sistema de segurança dos *chillers*

Como mecanismo de segurança, serão utilizados três sensores de temperatura na tubulação de entrada e saída de água dos *chillers*. Um deles posicionado na entrada dos dois *chillers* (Temperatura de entrada dos *Chillers* ou TEC), e os outros dois posicionados na saída de cada um dos *chillers* (Temperatura de Saída dos *Chillers* 1 e 2 ou TSC1 e TSC2).

A temperatura da saída dos *chillers* deverá estar em torno de TSF1 e TSF2 (temperaturas de *setpoint* fria dos *chillers* 1 e 2 respectivamente) e a de entrada em torno de TSQ (temperatura de *setpoint* quente dos dois *chillers*). Estas três temperaturas de *setpoint* devem ser escolhidas de acordo com estudos feitos da operação dos equipamentos, do sistema de tubulação e dos ambientes climatizados, e por isso não serão determinadas aqui.

Uma das estratégias de segurança será feita automaticamente. Primeiramente, após o ligamento dos compressores, espera-se 3 minutos (tempo seguro para se medir as temperaturas de saída e chegada) e checa-se se o *chiller* 1 (compressores A) foi ligado. Se estiver desligado, as checagens 1 e 2, abaixo, não são feitas e pula-se para a checagem 3 e 4. Caso esteja ligado, são feitas duas checagens a seguir:

1. Se a temperatura de saída do *chiller* 1 é igual a temperatura de *setpoint* fria 1, mais uma folga (esta folga deve ser colocada pois o sistema é incapaz de manter a temperatura totalmente constante mesmo quando operando perfeitamente) : $TSC1 = TSC1_{fria} + \text{folga}$
2. E se a temperatura de entrada do *chiller* 1 é igual a temperatura de *setpoint* quente mais uma folga: $TEC = TSC2_{quente} + \text{folga}$.

Caso qualquer uma das duas checagens seja falsa, aparecerá uma mensagem de alarme na tela, o *chiller* 1 será desligado e operador deverá operar manualmente e solucionar o problema. Caso não haja operação manual o sistema permanecerá desligado. Caso as duas checagens sejam verdadeiras o sistema está funcionando corretamente e passa para a próxima checagem (próximo parágrafo).

Se o *chiller* 1 estiver desligado ou estiver ligado e funcionando corretamente, o sistema então é checado se o *chiller* 2 (compressores B) está ligado. Caso esteja desligado o sistema continua operando normalmente, e caso esteja ligado é feita a terceira e quarta checagem:

3. A temperatura de saída do *chiller* 2 é igual a temperatura de *setpoint* fria 2, mais ou menos uma folga. $TSC2 = TSC2_{fria} + \text{folga}$.
4. E se a temperatura de entrada do *chiller* 1 é igual a temperatura de *setpoint* quente mais ou menos uma folga: $TEC = TSC2_{quente} + \text{folga}$.

Se as checagens 3 e 4 forem verdadeiras, significa que o sistema está funcionando perfeitamente e deve continuar operando. Se as checagens forem falsas, significa que há alguma falha, uma mensagem aparecerá na tela, o *chiller* 2 será desligado e o operador deverá operar manualmente e solucionar o problema. Caso não haja operação manual o sistema permanecerá desligado.

Como segunda estratégia de segurança, as temperaturas de saída e entrada dos *chillers* naquele momento (TSC1, TSC2, TEC) devem ser mostradas na tela de supervisão durante todo o período de ativação do sistema para consulta do operador.

Quando houver um acionamento manual dos compressores, o sistema de controle só será acionado novamente se o operador religa-lo ou se o sistema de *chillers* for desligado e religado.

As Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 representam o sistema de controle dos *chillers* e sua segurança, conforme descrito anteriormente.

5.2.2.3 Fluxograma do sistema de controle para os *chillers*

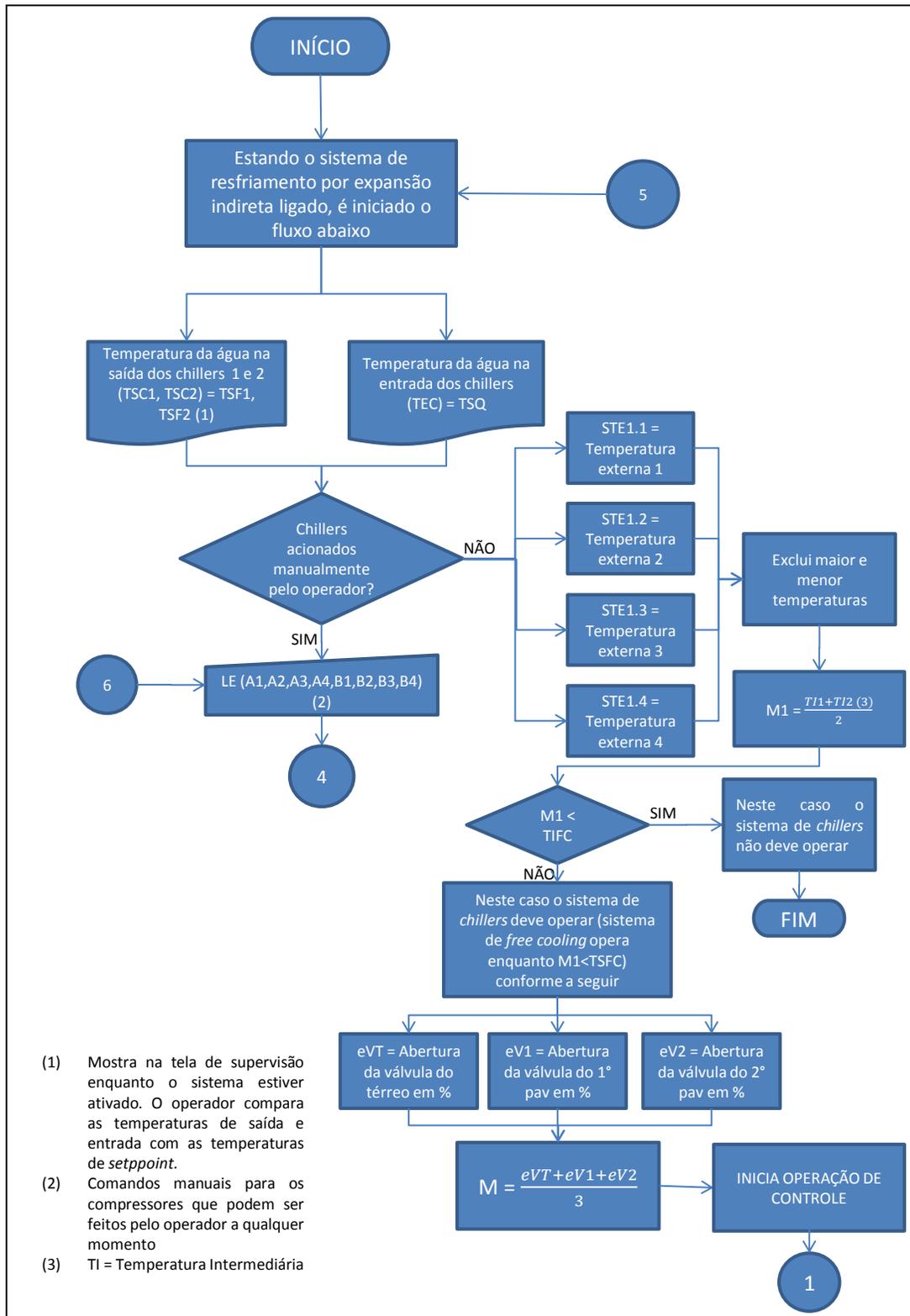


Figura 5.3 Fluxograma do sistema de controle para os chillers – parte 1

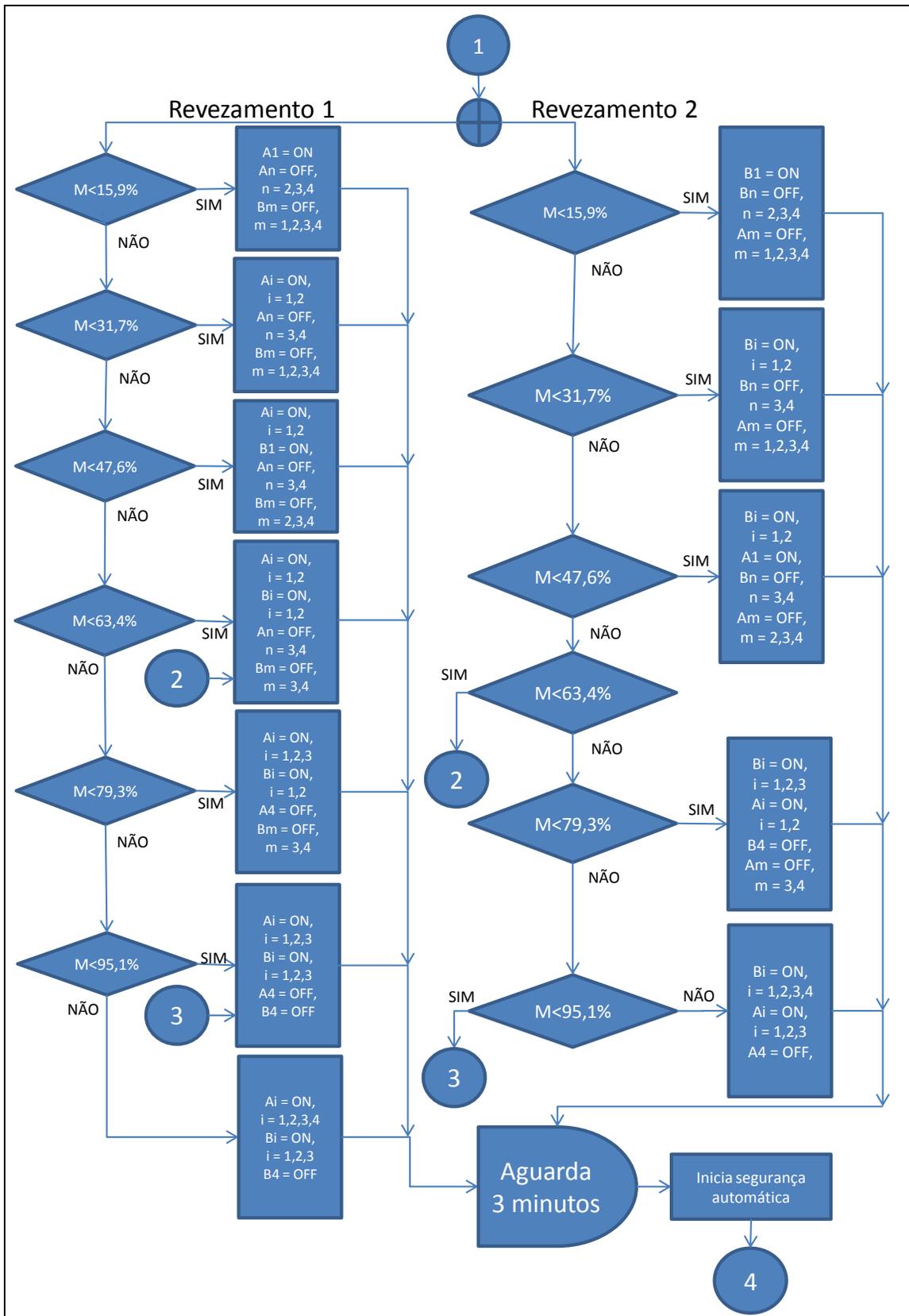


Figura 5.4 Fluxograma do sistema de controle para os chillers – parte 2

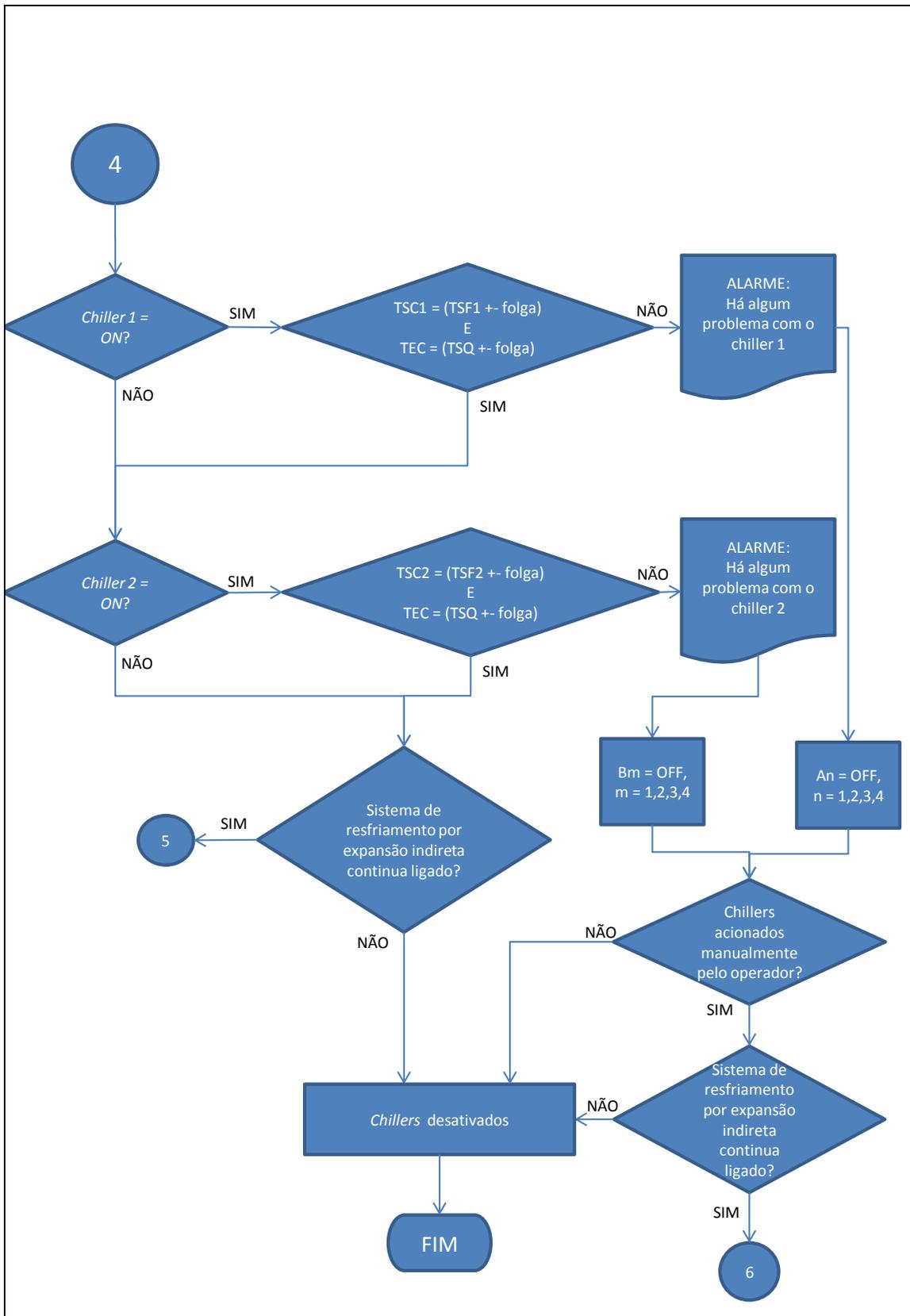


Figura 5.5 Fluxograma do sistema de controle para os chillers – parte 3

5.2.3 Lógicas e estratégias de controle para as bombas secundárias

As duas bombas secundárias de ação proporcional serão responsáveis para bombear a água que sai dos *chillers* até as serpentinas dos *fancoils*. Como já dito anteriormente no capítulo 2, estas bombas devem ser dimensionadas para atender o fluxo de água necessário para o perfeito funcionamento do sistema, ou seja, a bomba secundária 1 (BS1) deve ser capaz de suprir 50% da demanda do sistema e a bomba secundária 2 (BS2) deve ser capaz de suprir os outros 50%.

O dimensionamento das bombas deve ser feito pelo projetista do ar condicionado e não é escopo deste trabalho, cujo objetivo é projetar o sistema de controle.

Como as bombas devem impulsionar a água que vai para os *fan-coils*, elas irão funcionar baseando-se na porcentagem de abertura das válvulas (usando a média das porcentagens de abertura, “M”, da mesma forma que é feito o funcionamento dos *chillers*). Desta forma, quanto mais abertas estiverem as válvulas, mais água deve ser bombeada.

A ação das bombas com relação às válvulas será diretamente proporcional. Neste caso há necessidade do uso de um controlador PID. Este tipo de controlador adiciona um elemento preventivo à resposta do controle, que cuida para que não haja mudanças bruscas na alimentação do controle das bombas. Em outras palavras, se ao ligar o sistema todas as válvulas estivessem 100% abertas, caso não houvesse um controlador PID acoplado, o sistema iria subitamente mandar o sinal para que as bombas operassem com 100% de sua potência. Esta aceleração brusca iria danificar o equipamento e trazer sérios prejuízos. O controlador PID é explicado de forma um pouco mais detalhada no Apêndice I.

Assim, levando em consideração que cada bomba é capaz de suprir 50% da capacidade do sistema, quando a média de abertura das válvulas for feita, a bomba secundária 1 deve operar a M% de sua potência nominal e a bomba secundária 2 também deve operar a M% de sua potência nominal (onde M é a média de abertura das três válvulas). Contudo o valor de operação das bombas não deve ir bruscamente para o *setpoint* M. Por isso será usado um controlador PID para cada bomba.

Esta estratégia garante que as duas bombas só estarão em pleno funcionamento se a demanda estiver em 100% (válvulas 100% abertas). Por exemplo, se a demanda do edifício for de 80% da capacidade máxima do sistema, cada bomba vai suprir esta demanda em 40%. Contudo, como cada bomba tem capacidade para suprir até 50% do sistema, quando for

necessário que supram 40% da demanda do edifício as duas bombas estarão operando a 80% de sua capacidade máxima.

Outro exemplo para facilitar o entendimento seria quando o edifício demanda 35% da capacidade máxima do sistema. Neste caso a bomba secundária 1 opera a 35% de sua capacidade (17.5% da necessidade do sistema neste caso) e a bomba secundária 2 opera também a 35% de sua capacidade (17.5% da necessidade do sistema neste caso). Portanto, as bombas secundárias 1 e 2 suprem os 35% (17.5% + 17.5%) da capacidade do sistema que o edifício está demandando naquele momento.

Portanto, usando-se a estratégia de controle descrita acima, as bombas irão agir de acordo com a necessidade do sistema. Quando a necessidade for alta as bombas trabalharão com mais potência, e quando for baixa, as bombas trabalharão com menos potência. Os PIDs, cujas entradas são os próprios valores das potências das bombas em porcentagem, garantirão que não haverá variações bruscas, e que o sistema irá funcionar com a potência das bombas no valor de *setpoint* "M". Com isso o aumento na economia de energia é garantido, pois o sistema nunca estará operando acima ou abaixo da necessidade.

5.2.3.1 Sistema de segurança das bombas secundárias

Para que haja um monitoramento do funcionamento das bombas de controle serão utilizadas duas estratégias na programação.

Na primeira estratégia haverá um sensor de pressão na saída de cada bomba. Estes sensores devem medir a pressão na tubulação de saída de cada uma das bombas e compará-las com as respectivas pressões de *setpoint* mais uma folga (PSBS1 é Pressão de *Setpoint* da Bomba secundária 1 e PSBS2 é Pressão de *Setpoint* da Bomba secundária 2): $PBS1 = PSBS1 \pm \text{folga}$ e $PBS2 = PSBS2 \pm \text{folga}$.

Como as bombas e as válvulas trabalham simultaneamente, a pressão na saída não deve se afastar muito do *setpoint*, mesmo com as bombas operando a máxima potência (quanto maior a potência de operação maior será a abertura das válvulas). As pressões de *setpoint* e as folgas devem ser determinadas pelo profissional responsável pelo modelamento do sistema. Caso a pressão esteja muito acima ou muito abaixo do *setpoint* (de forma a ultrapassar a folga), significa que há algum problema no sincronismo entre a abertura das válvulas e a potência das bombas. Uma variação destas (especialmente que gere uma pressão muito elevada) pode causar sérios problemas ao equipamento e ao sistema de tubulação.

Assim, caso a comparação entre as pressões for falsa, o sistema deve avisar ao operador e desativar as bombas secundárias. A desativação das bombas secundárias não gera grandes problemas mesmo se as primárias estiverem em funcionamento por causa da redundância existente no sistema de tubulação (discutida anteriormente no capítulo 2).

Contudo se uma bomba secundária for ligada com mais potência do que o predeterminado pelo sistema de controle, sérios problemas podem ocorrer. Por isso não se colocou operação manual do operador para o controle das bombas secundárias.

Na segunda estratégia, será feito um procedimento semelhante ao das bombas primárias. Com o uso de dois relés de sobrecarga, será monitorado constantemente se há ou não algum problema com as bombas. Caso algum dos relés de sobrecarga esteja ligado (RSBS1 = ON ou RSBS2 = ON, onde RSBS é Relé de Sobrecarga da Bomba Secundária de ação NF) o sistema será desativado e mostrará uma mensagem ao operador.

Portando, em qualquer situação de problema, as bombas serão desativadas e o operador será avisado para que possa solucioná-lo. A Fig 5.6 representa o sistema de controle das bombas secundárias e sua segurança, conforme descrito anteriormente.

5.2.3.2 Fluxograma do sistema de controle para as bombas secundárias

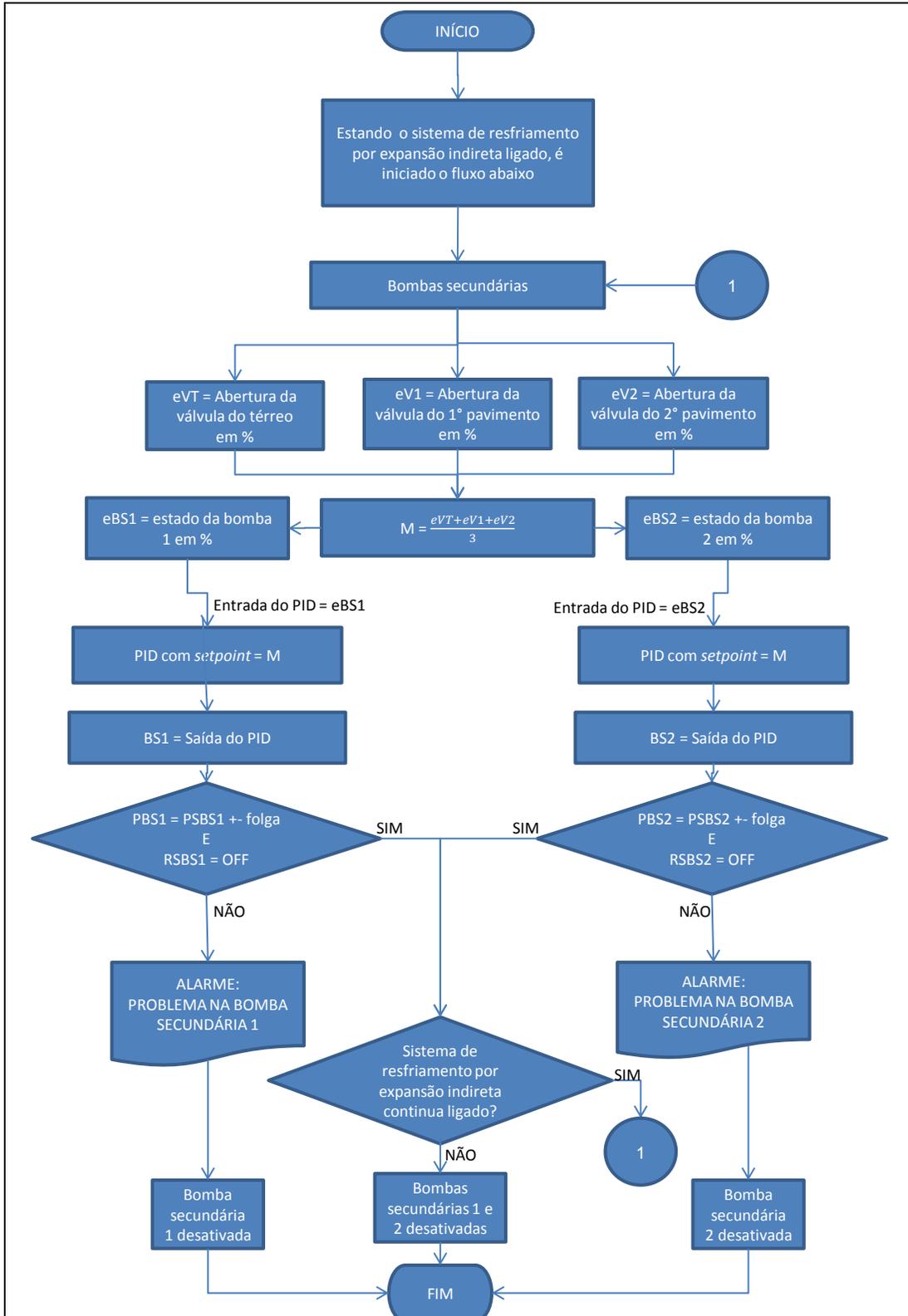


Figura 5.6 Fluxograma do sistema de controle para as bombas secundárias.

5.2.4 Lógicas e estratégias de controle das válvulas de fluxo

No edifício n-ZEB haverá três válvulas de fluxo de ação proporcional. Cada uma destas válvulas irá regular a passagem de água gelada para os *fan-coils* do térreo, primeiro pavimento e segundo pavimento.

Estas válvulas irão trabalhar de forma completamente independente entre elas. Cada uma usará os parâmetros recebidos dos sensores de temperatura dos ambientes do respectivo pavimento.

O controle das válvulas será feito de acordo com a média aritmética de temperatura de todos os ambientes monitorados do pavimento. Haverá três médias distintas, a média do térreo (MT), a média do primeiro pavimento (MP1) e a média do segundo pavimento (MP2), e cada válvula vai operar de acordo com a média de seu pavimento.

Após o cálculo da média, o resultado será comparado com a temperatura da *setpoint* pré-selecionada (TST = Temperatura de *Setpoint* do Térreo; TSP1 = Temperatura de *Setpoint* do pavimento 1; TSP2 = Temperatura de *Setpoint* do pavimento 2). Quanto maior a diferença entre a média das temperaturas e a temperatura de *setpoint*, mais a válvula deve se abrir ou se fechar (abre caso a temperatura esteja acima do *setpoint* e fecha caso a temperatura esteja abaixo do *setpoint*).

Como forma de opção, é possível colocar termostatos nos ambientes no lugar dos sensores de temperatura. Estes termostatos, além de medir a temperatura do local no momento, possibilitam que o ocupante determine o *setpoint* da temperatura que deseja. Por exemplo, se a temperatura de *setpoint* para o sistema em modo automático foi escolhida em 22°C, o usuário pode achar que esta é uma temperatura elevada e desejar baixa-la para 19°C. Esta redução iria alterar a média do pavimento, e desta forma a porcentagem de abertura das válvulas.

Os termostatos não serão colocados neste projeto, pois a lógica da programação seria exatamente a mesma (o que mudaria seria o apenas a temperatura de *setpoint*, que seria determinada pelo usuário e não pelo engenheiro desenvolvedor do sistema). Desta forma, caso no futuro seja necessário colocar os termostatos, basta substituir os sensores de temperatura por estes dispositivos e colocar a temperatura de *setpoint* acoplada ao mecanismo do equipamento. Neste caso o usuário pode escolher uma temperatura ou deixar o sistema funcionar em modo automático.

Para o controle das válvulas serão usados controladores PID (Apêndice I). Estes controladores irão funcionar baseados na temperatura de *setpoint* do pavimento (que é determinada pelo desenvolvedor do sistema ou pelo usuário, caso estejam sendo usados termostatos) e da média das temperaturas medidas, ou seja, quanto maior for a diferença entre elas maior deve ser a abertura ou o fechamento das válvulas.

É importante ressaltar que o PID será ajustado para controlar a abertura e fechamento exatamente de acordo com as necessidades do sistema. Desta forma não haverá abertura nem fechamento bruscos. Mesmo que a temperatura ambiente esteja mais baixa que o *setpoint*, o sistema poderá continuar operando para não permitir que ela se eleve e cause desconforto térmico. Além disso, caso a temperatura esteja muito baixa e o sistema não precise permanecer ligado, é o controlador PID que vai determinar se a válvula se fechará quase por completo ou não. Caso as válvulas se fechem, todo o sistema irá desligar (os compressores, as bombas secundárias e as bombas primárias não ligarão).

5.2.4.1 Sistema de segurança das válvulas de fluxo

Para que possa haver uma supervisão, a média das temperaturas, as temperaturas de *setpoint* de cada pavimento e a porcentagem de abertura de cada válvula serão constantemente mostradas para o operador.

Caso o operador detecte algum problema, poderá acionar a operação manual individual das válvulas, e neste caso, o sistema só irá operar automaticamente para a válvula de novo, quando o operador desativar a operação manual para aquela válvula específica.

Além disso, serão mostrados todos os ambientes que tiverem uma temperatura X°C acima ou abaixo da temperatura média do pavimento. Com isto será possível determinar se algum ambiente está com uma temperatura muito diferente dos demais. Tendo acesso a esta informação o operador pode checar a situação e tomar uma ação caso haja algum problema neste ambiente. A temperatura X°C deve ser selecionada pelo desenvolvedor do sistema de acordo com as análises necessárias.

As Figuras 5.7 e 5.8 representam o sistema de controle das válvulas de fluxo e sua segurança, conforme descrito anteriormente.

5.2.4.2 Fluxograma do sistema de controle para as válvulas de fluxo

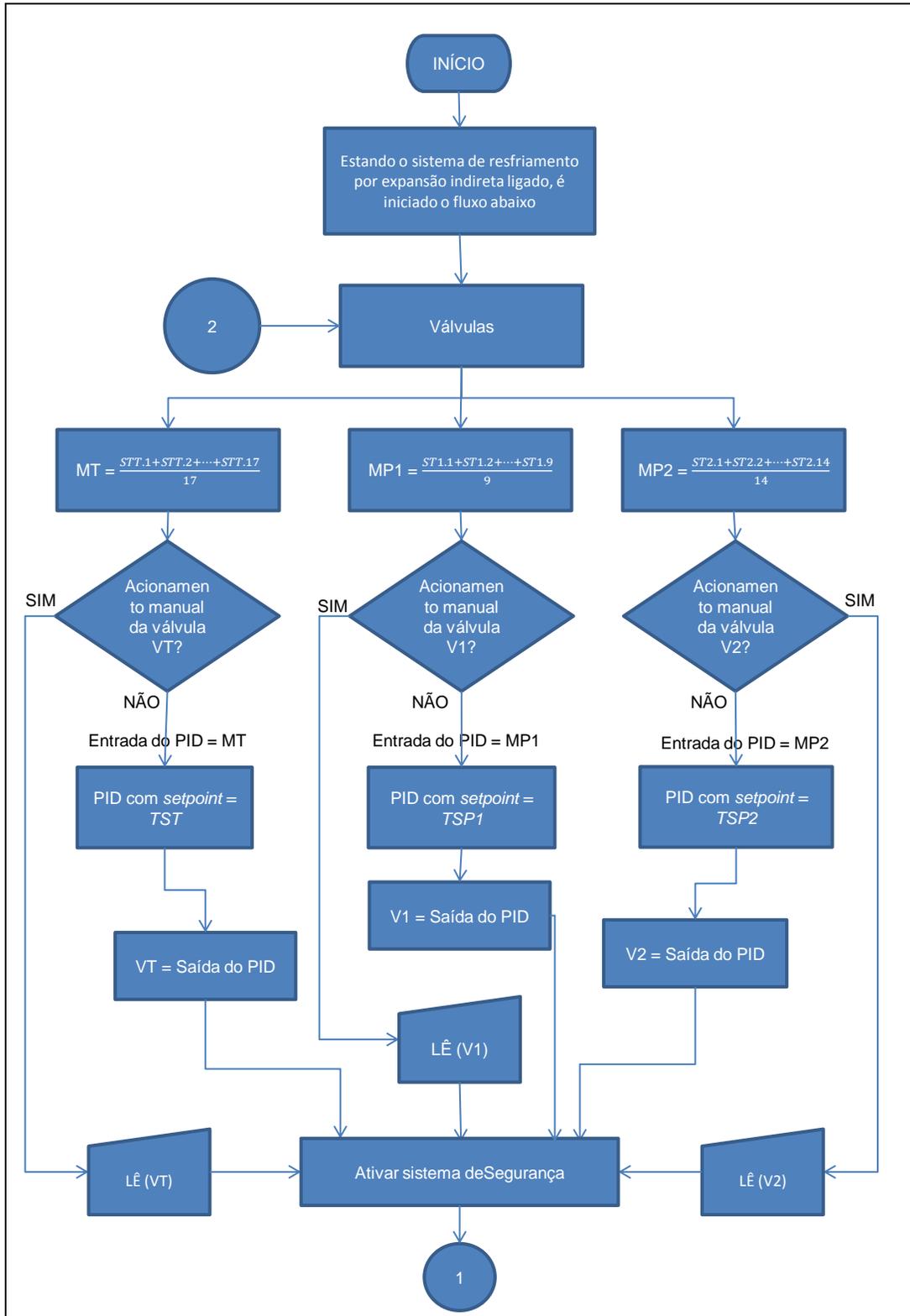


Figura 5.7 Fluxograma do sistema de controle para as válvulas de fluxo – parte 1

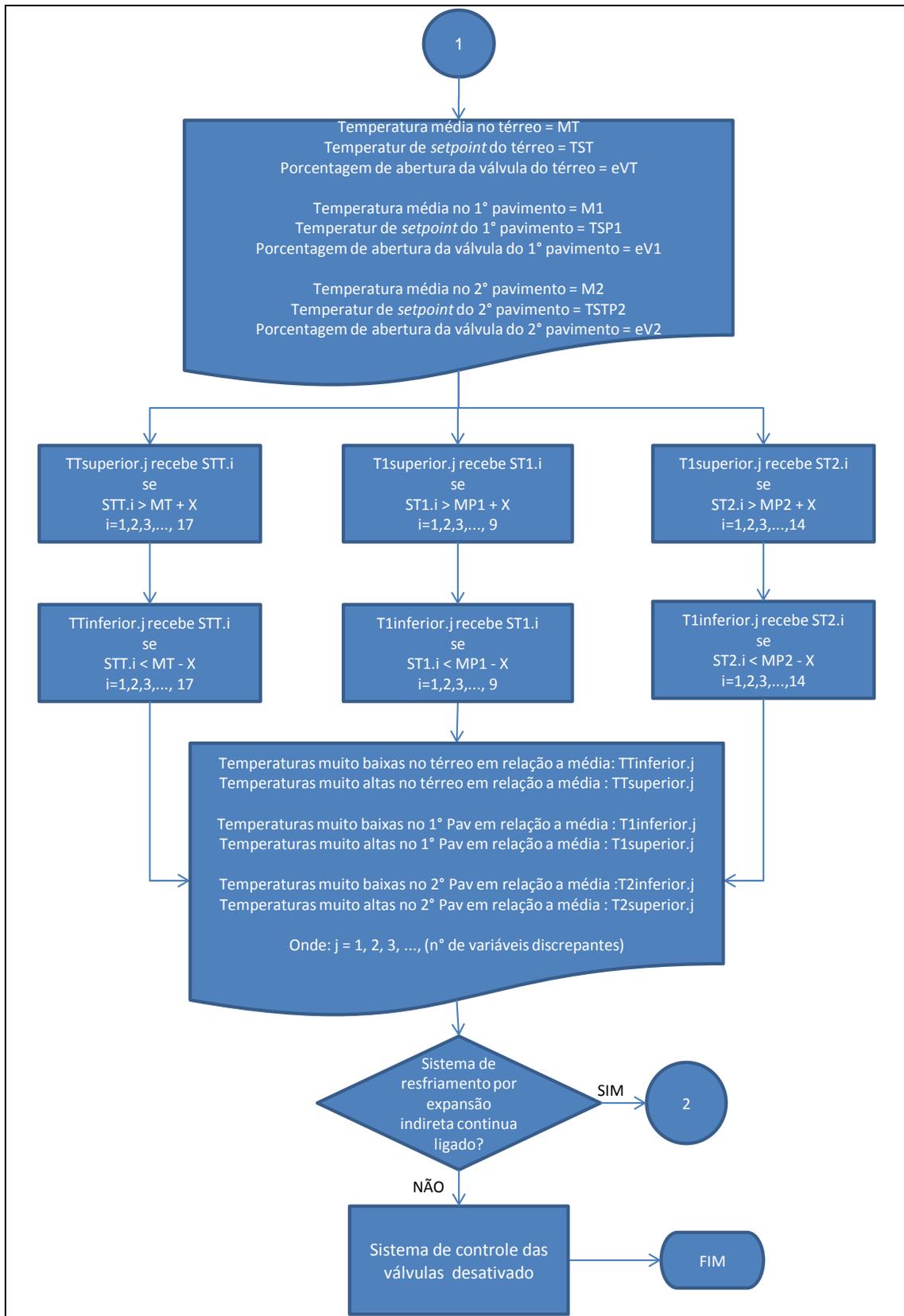


Figura 5.8 Fluxograma do sistema de controle para as válvulas de fluxo – parte 2

5.3 CONTROLE DO SISTEMA DE VOLUME AR VARIÁVEL

A seguir serão mostrados os procedimentos de controle que serão utilizados para os componentes do sistema de VAV. Esses procedimentos serão utilizados para que possa haver melhor entendimento nos fluxogramas que serão apresentados em seguida. Reitera-se mais uma vez a necessidade de se utilizar a lista de pontos apresentada no Apêndice II ou a lista de símbolos no início do trabalho para melhor entendimento dos fluxogramas. As abreviações das variáveis de *setpoint* não são contempladas na lista de pontos por serem variáveis virtuais. Estas abreviações serão expostas nas explicações dos sistemas de controle, antes dos fluxogramas e na lista de símbolos no início do trabalho.

5.3.1 Lógicas e estratégias de controle para as caixas de VAV

Como explicado no capítulo 3, as caixas de VAV possibilitarão o controle do fluxo de ar que será transmitido a todos os ambientes climaticamente controlados do edifício n-ZEB.

As caixas de VAV somente devem ficar ativadas se o sistema de VAV estiver em funcionamento. O equipamento que apresenta maior desafio no controle das caixas de VAV são os seus *dampers*. Estes *dampers* são de ação proporcional e devem ser operados de acordo com a temperatura interna do ambiente a ser climatizado.

Basicamente haverá uma temperatura de *setpoint* para cada ambiente climatizado ($TSAX.x$ = Temperatura de *Setpoint* Ambiente para um ambiente x no pavimento X), que deve ser escolhida pelo engenheiro responsável pela implementação do sistema. Além disso, é necessário prever uma segunda temperatura de *setpoint*, um pouco mais elevada que a $TSAX.x$ para quando não houver ocupação no ambiente. Desta forma, quando o sensor de presença ($SPX.x$ = Sensor de presença de um ambiente x no pavimento X) estiver em OFF (sem ocupação), a temperatura de *setpoint* considerada deve ser a temperatura de *setpoint* de desocupação ($TSDX.x$ = Temperatura de *setpoint* de desocupação para um ambiente x no pavimento X).

Assim como explicado no sistema de controle das válvulas de fluxo, poderá haver termostatos no lugar dos sensores de temperatura para que o ocupante possa determinar a temperatura de *setpoint*. As duas temperaturas de *setpoint*, neste caso, ($TSAX.x$ e $TSDX.x$) não serão levadas em consideração.

O uso deste dispositivo não altera a lógica de programação e, a única consequência será que quem vai escolher a temperatura de *setpoint* é o ocupante do ambiente, e não o engenheiro responsável pelo sistema. Contudo mesmo com uso dos termostatos o ocupante do ambiente pode ainda optar por deixar o sistema em automático, e nesse caso o *setpoint* será o predeterminado pelo engenheiro. Estes dispositivos não foram colocados neste projeto, mas para que sejam utilizados, basta substituir os sensores pelos termostatos e colocar a temperatura de *setpoint* como aquela determinada pelo usuário (que pode ser automática ou não).

A abertura dos *dampers* de VAV do ambiente x do pavimento X (DPX.x) será determinada pela temperatura de *setpoint* (que pode ser TSAX.x ou TSDX.x, de acordo com o sensor de presença). Haverá necessidade de utilizar-se um controlador PID (Apêndice I). Este controlador funcionará baseado na temperatura de *setpoint* e na temperatura atual do ambiente. Sua função é enviar o sinal de controle para o *damper* para que a temperatura ambiente seja modificada até alcançar o *setpoint* (TSAX.x ou TSDX.x).

Portanto, quanto maior for a temperatura ambiente em relação ao *setpoint*, mais o *damper* deverá ser aberto, e quanto menor for a temperatura do ambiente interno em relação ao *setpoint*, mais o *damper* se fecha. O PID irá garantir que o sistema não varie bruscamente e que, mesmo que a temperatura ambiente esteja mais baixa que o *setpoint*, o sistema continue operando para não permitir que ela se eleve e cause desconforto térmico. Caso a temperatura esteja muito baixa, de forma que o sistema não precise permanecer ligado, é o controlador PID que vai determinar se o *damper* se fechará quase por completo ou não. Caso os *dampers* se fechem, o ventilador do *fan-coil* vai diminuir ou suspender sua operação (de acordo com a lógica de programação do ventilador que será mostrada a seguir) e o sistema de VAV ficará em modo de espera até que precise ser utilizado novamente.

Como existem várias caixas de VAV em todo o edifício (49 ao todo) e seu funcionamento é independente e igual para todos os ambientes (independente, pois utiliza a temperatura do ambiente em questão, e igual, pois utiliza exatamente os mesmos procedimentos de controle), será exposta a lógica de apenas uma caixa aleatória, e esta lógica poderá ser usada para todas as outras.

5.3.1.1 Sistema de segurança das caixas de VAV

Para que possa haver uma supervisão por parte do operador do sistema, a abertura de todas as caixas de VAV de cada pavimento será constantemente mostrada ao operador juntamente com a temperatura interna do ambiente em questão. Além disso, o operador poderá alterar a abertura de cada *dampers* manualmente caso seja necessário. O sistema de controle manual ficará ativo até que o operador o desative, ou até que o sistema seja desligado e religado.

Outra estratégia de segurança será através do uso do sensor de fluxo de ar. Este sensor deverá medir o fluxo de ar que passa pela caixa VAV de forma a comparar com um fluxo de *setpoint* predeterminado. Se o fluxo de um ambiente x de um pavimento X (SFAX.x) estiver maior ou menor que o fluxo de *setpoint* do ambiente x deste pavimento X (FSX.x) mais ou menos uma folga, ou seja, se $SFAX.x > FSX.x + FOLGA$ ou $SFAX.x < FSX.x - FOLGA$, significa que há alguma falha no *dampers*, no ventilador do *fan-coil*, ou no próprio sensor. Nesta situação o operador será informado através de um alarme no sistema e o acionamento manual será ativado para que o operador tome alguma providência.

O sistema também fará uma checagem de abertura média no sistema (explicado no capítulo 3 como identificação das “rogue zonas”). Da mesma forma que foi feito no sistema de segurança das válvulas, onde as temperaturas discrepantes são informadas ao operador, aqui será feita a identificação dos *dampers* com abertura discrepante em relação à média de abertura dos *dampers* do sistema (MT, MP1 e MP2). Assim serão mostrados todos os ambientes que os *dampers* estiverem com abertura “A” acima ou abaixo da média das aberturas (onde “A” deve ser selecionado pelo engenheiro projetista do sistema). Como este sistema de segurança envolve as caixas de VAV de todo o edifício, ele será feito em um fluxograma separado do fluxograma do resto do controle das caixas.

A Figura 5.9 representa o sistema de controle das caixas de VAV e sua segurança, conforme descrito no tópico 5.3.1. A figura 5.10 representa a segurança do sistema de VAV utilizando a estratégia de identificação das *rogue zones*, conforme descrito anteriormente.

5.3.1.2 Fluxograma do sistema de controle das caixas de VAV

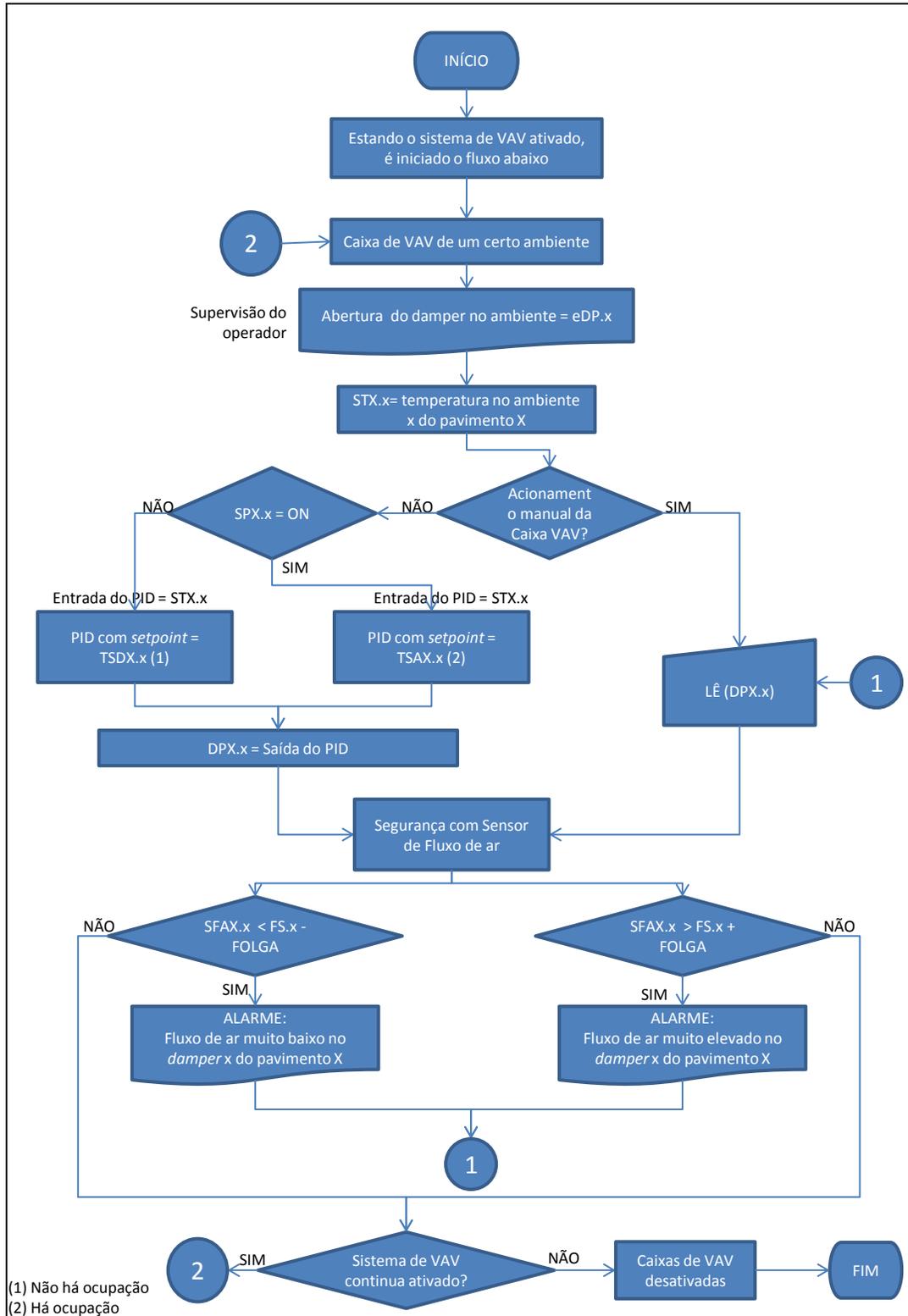


Figura 5.9 Fluxograma do sistema de controle para caixas de VAV

5.3.1.3 Fluxograma da segurança das caixas identificando as *Rogue Zones*

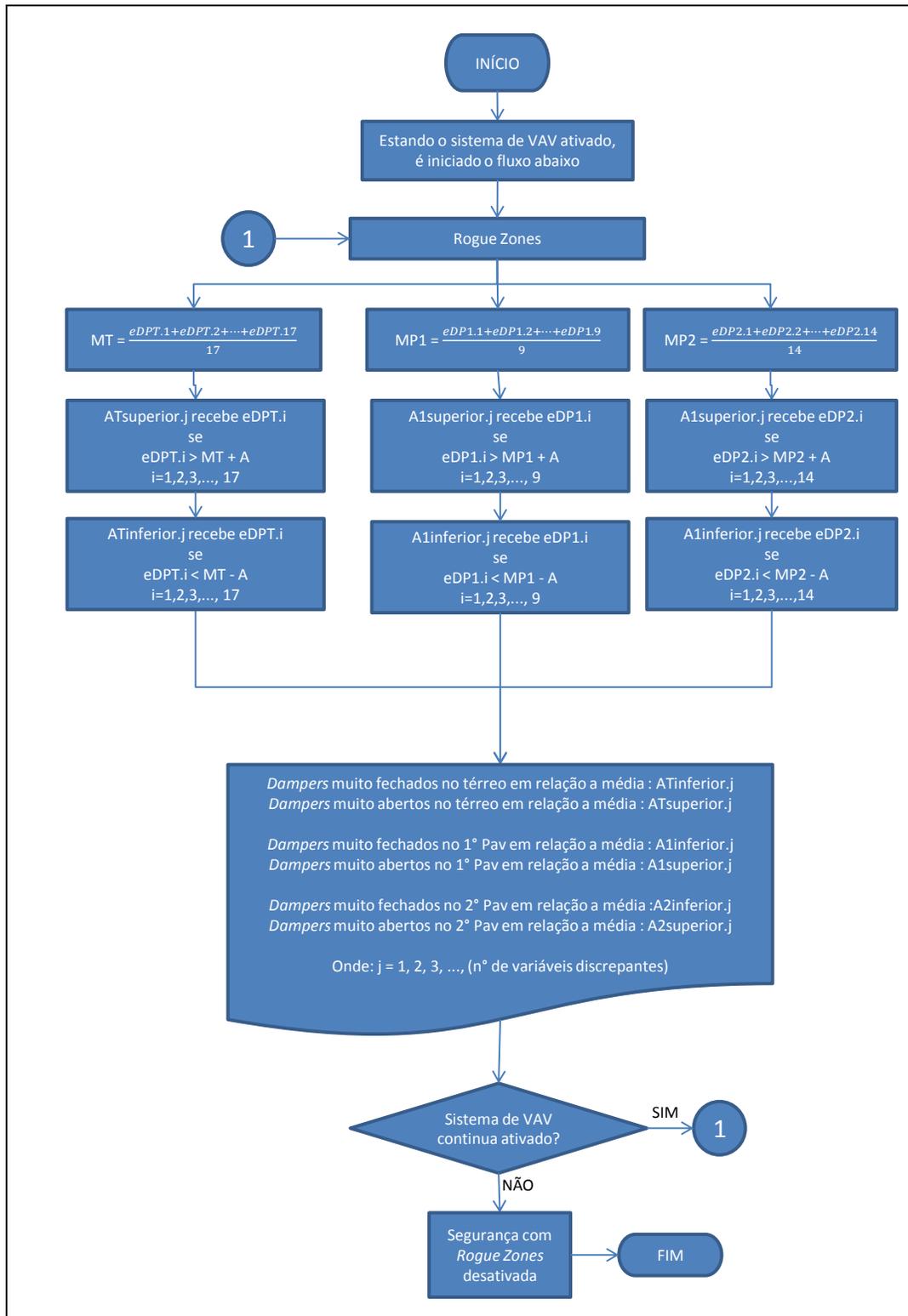


Figura 5.10 Fluxograma do sistema de controle para caixas de VAV: “Rogue Zones”

5.3.2 Lógicas e estratégias de controle para os ventiladores dos *fan-coils*.

Como explicado no capítulo 3, o edifício n-ZEB irá possuir um ventilador por pavimento. Estes ventiladores são de ação proporcional e estão acoplados à serpentina de água gelada. São responsáveis por suprir o ar para todo o edifício enquanto o sistema de VAV estiver ligado (independente se o sistema de refrigeração estiver ligado ou não).

O funcionamento destes ventiladores se baseia na *estratégia da otimização da pressão de ventilação* (explicada também no capítulo 3: sistema de VAV), onde a potência do ventilador é determinada pela pressão nos dutos de ventilação. Para realizar este monitoramento, um sensor de pressão é colocado a aproximadamente dois terços da distância entre a última caixa VAV e o ventilador.

Quanto maior for a pressão interna dos dutos, significa que o fluxo de ar está sendo enviado e não está encontrando passagem para sair, pois os *dampers* estão regulados para permitir pouca passagem de ar. Neste caso, o ventilador deve diminuir sua potência, porque está suprindo mais ar do que é necessário para a abertura dos *dampers* no momento. Caso os *dampers* estejam completamente fechados (se a temperatura ambiente estiver muito baixa), a pressão dos dutos de ventilação subirá muito, e o ventilador irá reduzir sua operação a praticamente 0 (sistema desativado).

Se a pressão interna dos dutos for baixa significa que o fluxo de ar enviado pelo ventilador não está sendo suficiente para suprir a abertura dos *dampers*. Neste caso o ventilador aumenta sua potência e envia mais ar ao sistema.

Para que o ventilador funcione de forma correta independente das variações dos *dampers*, será aplicado um controle PID (já explicado anteriormente). Este PID será modelado para uma pressão de *setpoint* predeterminada, que deve ser escolhida de forma a garantir uma pressão segura de acordo com o tamanho e comprimento dos dutos de ventilação. Ele será de operação indireta, ou seja, para se reduzir o valor atual do processo a saída deverá aumentar seu valor (quanto maior a pressão menor a potência do ventilador).

No projeto do sistema de controle, como ainda não foi feita a modelagem do sistema em si, será considerado que a pressão de *setpoint* nos dutos é PS. PST equivale à pressão de *setpoint* do térreo, PSP1 do primeiro pavimento e PSP2 do segundo pavimento.

A pesar de estarem na mesma lógica, o controle de cada ventilador é feito individualmente e o funcionamento de um não influencia o dos outros. Quando, por exemplo, a pressão nos

duto do térreo (SPT) está abaixo do *setpoint* PSPT, o ventilador VENTT vai aumentar sua potência com auxílio do PID de forma a alcançar a pressão predeterminada. O mesmo acontece em cada um dos outros pavimentos.

5.3.2.1 Sistema de segurança dos ventiladores dos *fan-coils*.

Como forma de segurança para controle para os ventiladores, haverá três relés de sobrecarga, um para cada ventilador. Estes relés irão monitorar caso haja algum problema nos ventiladores. Quando os relés estiverem ligados (RSVENTT = ON ou RSVENT1 = ON ou RSVENT2 = ON), o acionamento manual dos ventiladores poderá ser ativado pelo operador. Caso não haja ativação manual o sistema será desligado.

Além disso, será constantemente mostrada a potência dos ventiladores e a pressão nos dutos de ventilação durante todo o período de operação destes equipamentos, e o operador poderá operar os ventiladores manualmente a qualquer momento que seja necessário. A ativação manual só será encerrada caso o operador a cancele ou caso o sistema seja desligado e religado.

A Figura 5.11 representa o sistema de controle das dos ventiladores dos *fan-coils* e sua segurança, conforme descrito anteriormente.

5.3.2.2 Fluxograma do sistema de controle dos ventiladores dos *fan-coils*.

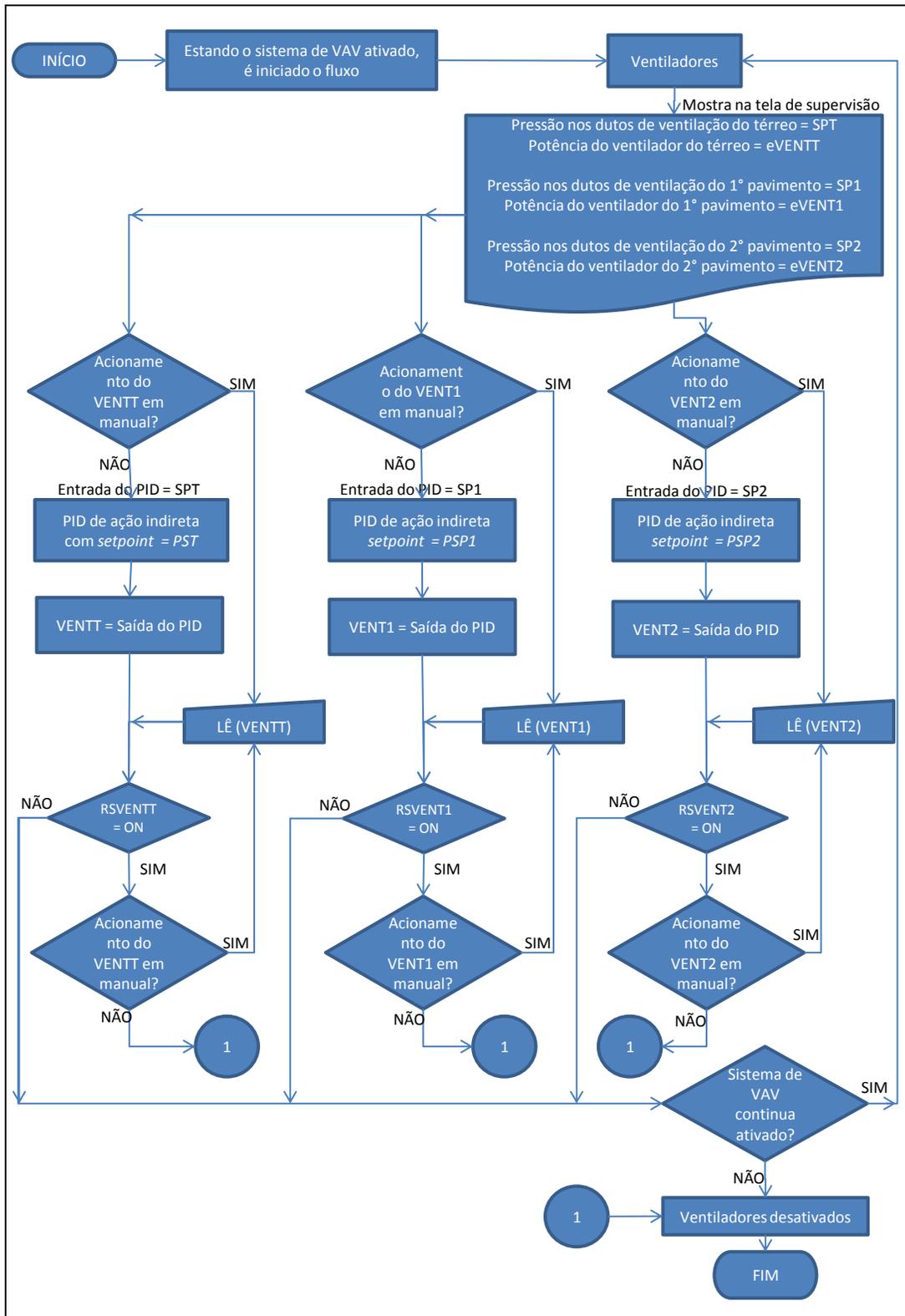


Figura 5.11 Fluxograma do sistema de controle para os ventiladores dos fan-coils

5.3.3 Lógicas e estratégias de controle para o *free cooling*

O *free cooling* vai ser controlado pela ação dos *dampers* de *free cooling*, *dampers* barométricos e dos *dampers* de retorno (como já explicado no capítulo 3). Como há apenas um *damper* de *free cooling* por pavimento, existirão 3 destes *dampers* em todo o edifício (eles tem a função de permitir a entrada do ar externo no edifício). Já os *dampers* de retorno e barométricos vão estar distribuídos por todos os ambientes que tiverem uma caixa VAV.

O funcionamento de todos os *dampers* de retorno e barométricos de um mesmo pavimento será controlado pela mesma lógica de programação. Além disso, as lógicas de programação são idênticas para os três pavimentos. Portanto será explicado apenas o funcionamento dos *dampers* para um pavimento qualquer, e a explicação pode ser generalizada para todos os outros pavimentos.

Este sistema irá funcionar baseado na temperatura externa. Para isto serão utilizados os 4 sensores de temperatura externos. Estes 4 sensores ficarão localizados nas paredes externas do 1º pavimento. Para evitar que a temperatura seja medida de forma errada, será tirada uma média (ME) dos sensores que funcionará da seguinte forma: A maior e a menor temperatura medidas serão excluídas e a média ME será feita apenas com as duas temperaturas restantes.

Quando a temperatura média “ME” for menor que TIFC (Temperatura Inferior de *Free Cooling*, já apresentada no controle dos *chillers*) significa que o ambiente interno pode ser climatizado apenas com o ar externo. Neste caso, o sistema de resfriamento por expansão indireta com *chiller* de condensação a ar é desligado (pela lógica de controle dos *chillers* já explicada), o *damper* de *free cooling* abre, o *damper* barométrico também abre e o *damper* de retorno fecha. Com isto o ar vem de fora, entra pelo *damper* de *free cooling*, passa pelo ventilador do *fan-coil* e pela serpentina de resfriamento (que vai estar desativada já que o sistema de resfriamento com *chiller* está desligado) até chegar ao ambiente. Como o *damper* de retorno está fechado, o ar quente que estava dentro é impedido de voltar ao ventilador do *fan-coil* e é obrigado a passar pelo *damper* barométrico até o ambiente externo, completando o ciclo do *free cooling*.

Caso a média das temperaturas externas (ME) esteja maior que TIFC e menor que TSFC (Temperatura Superior de *Free Cooling*), o sistema de resfriamento por expansão indireta com *chiller* de condensação a ar é religado e o *free cooling* também permanece ativado (conforme já foi explicado na lógica de controle dos *chillers*).

Por fim, caso a média de temperatura externa esteja maior que TSFC, significa que o ar externo está quente e não pode ser levado ao ambiente interno. Neste caso o sistema de *free cooling* é desativado: o *damper* de *free cooling* fecha impedindo que o ar externo entre, o *damper* barométrico também fecha impedindo que o ar interno saia e o *damper* de retorno abre de forma a permitir que o ar interno circule pelo sistema de dutos até os ventiladores e as serpentinas de resfriamento.

A estratégia de controle do *free cooling* deve estar sempre ativada (mesmo que o *free cooling* não esteja em funcionamento) enquanto o sistema de VAV estiver em funcionamento, para que a temperatura externa seja constantemente monitorada. Com isto é possível determinar caso a temperatura caia ou se eleve num mesmo dia, e desta forma ligar ou desligar o *free cooling* quando for necessário. Em Brasília, como a temperatura costuma variar bastante no mesmo dia, a estratégia de *free cooling* pode, por exemplo, ser utilizada durante as primeiras horas da manhã e durante as últimas horas do dia, quando a temperatura externa é mais baixa.

Portanto, o *free cooling* e deve ser ligado apenas se a temperatura externa cair abaixo da temperatura superior de *free cooling* (TSFC). Neste caso, de acordo com a lógica do sistema de chillers, ambos os sistemas funcionarão em conjunto até que a temperatura caia abaixo da temperatura inferior de *free cooling* (TIFC), quando os chillers serão desligados. Esta estratégia garante que, sempre que o ar externo estiver frio o suficiente, o único equipamento que ficará ligado constantemente será o ventilador do *fan-coil*, já que uma vez ajustados, os *dampers* não consomem mais energia. Com isto a economia se torna significativamente alta, pois o resfriamento com *chillers* só é usado quando for estritamente necessário (em conjunto com o *free cooling* ou quando a temperatura externa for elevada).

5.3.3.1 Segurança do *free cooling*

Para este sistema, os estados dos *dampers* serão mostrados para o operador sempre que o sistema de VAV estiver ligado, independente do uso do *free cooling* ou não. Será mostrado do *damper* de *free cooling* de cada pavimento e os *dampers* barométricos e de retorno de cada ambiente x de cada pavimento X.

Além disso, será mostrada também a média externa (ME). Desta forma o operador pode supervisionar se o sistema. A Figura 5.12 representa o sistema de controle do *free cooling* e sua segurança, conforme descrito anteriormente.

5.3.3.2 Fluxograma para o free cooling

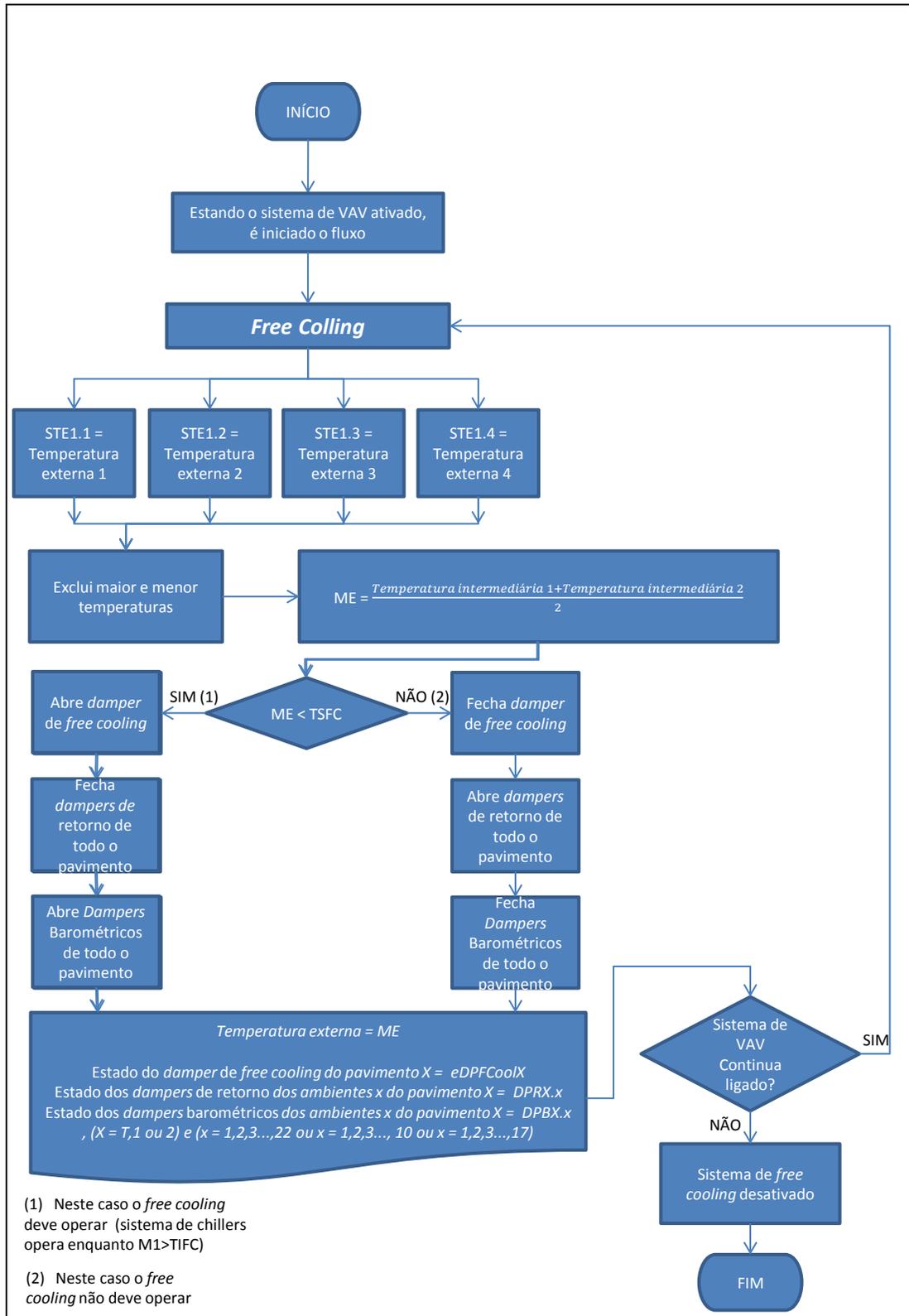


Figura 5.12 Fluxograma do controle para o free cooling

5.4 CONTROLE DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO

A seguir serão mostrados os procedimentos de controle que serão utilizados para os componentes deste sistema de refrigeração. Esses procedimentos serão utilizados para que possa haver melhor entendimento nos fluxogramas que serão apresentados em seguida. Reitera-se mais uma vez a necessidade de se utilizar a lista de pontos apresentada no Apêndice II ou a lista de símbolos no início do trabalho para melhor entendimento dos fluxogramas. As abreviações das variáveis de *setpoint* não são contempladas na lista de pontos por serem variáveis virtuais. Estas abreviações serão expostas nas explicações dos sistemas de controle, antes dos fluxogramas e na lista de abreviaturas no início do trabalho.

5.4.1 Lógicas e estratégias de controle para as bombas de água e para os *dampers* de saída

Os *dampers* de saída determinam se o ar vai ou não passar pelo sistema de resfriamento evaporativo, e as bombas são responsáveis por molhar as esponjas dos resfriadores. O controle destes *dampers* e bombas é feito através dos sensores de umidade. A Norma da ASHRAE 55-2010 – *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* determina que a temperatura média ideal para maior conforto térmico humano é em torno de 50%.

Para o controle deste sistema, será levado em consideração que, quando a umidade estiver menor que a umidade relativa de *setpoint* mínima (URMIN) as bombas de água vão ser ligar, os *dampers* de saída evaporativos irão abrir (permitindo que a água passe pelo resfriador evaporativo) e os *dampers* de saída comum irão fechar (impedindo que a água vá direto ao ambiente). Estes dispositivos permanecem desta forma até que a umidade atinja a umidade relativa de *setpoint* máxima (URMAX).

Quando a umidade ultrapassar URMAX, as bombas de água irão desligar, contudo, para evitar que se acumulem bactérias e fungos devido ao acúmulo de água nas esponjas, os *dampers* não irão se ajustar simultaneamente com o desligamento das bombas. Haverá uma espera de alguns minutos (tempo T predeterminado) antes que os *dampers* de saída evaporativos se fechem (impedindo que o ar continue passando pelo evaporador) e antes que os *dampers* de saída comum se abram (permitindo que o ar vá direto ao ambiente) para que o vento termine de secar a água acumulada. Após a mudança, os *dampers* permanecem desta forma até que a umidade atinja URMIN novamente.

Caso a umidade relativa esteja entre URMIN e URMAX o sistema deve permanecer no modo que estava. Por exemplo, se a bomba estiver ligada, deve permanecer desta forma até que a umidade chegue em URMAX e então é desligada. Se a bomba estiver desligada, deve permanecer assim até que a umidade caia para menos de URMIN e é então ligada.

Essa estratégia de colocar o sistema para operar com uma folga (URMAX-URMIN) com relação à umidade relativa foi utilizada, pois, como praticamente todo o sistema de resfriamento evaporativo para o edifício n-ZEB é de ação liga/desliga, seria inviável colocar um controlador (PID, por exemplo) para melhorar o controle do sistema. Desta forma, como as bombas sempre ligam (ar é umidificado) quando a umidade relativa estiver em URMIN ou menos e sempre desligam quando estiver em URMAX ou mais, é evitado que o sistema fique desligando e ligando repetidamente durante um curto intervalo de tempo, o que poderia trazer avarias aos equipamentos.

É importante notar que o funcionamento das bombas e dos *dampers* de saída não está relacionado diretamente com o sistema de resfriamento por expansão indireta com *chiller* de condensação a ar ou com a estratégia de *free cooling*, ou seja, as duas únicas variáveis que determinam se será ativado ou não é a umidade relativa do ambiente e o funcionamento do sistema de VAV. Sempre que o sistema de VAV estiver funcionando, o sistema de resfriamento evaporativo deve estar ativo (monitorando a umidade para determinar se estará ligado ou não). Caso o sistema de VAV não esteja ativo, não faz sentido o resfriamento evaporativo estar, pois não haveria ar sendo impulsionado pela esponja neste caso.

Portanto este sistema pode funcionar em qualquer situação em que a umidade estiver baixa e o sistema de VAV em funcionamento. Por exemplo, se qualquer um dos outros sistemas estiverem em funcionamento, o sistema evaporativo pode estar funcionando simultaneamente, ou não (depende da umidade relativa do ar naquele momento).

Essa estratégia de funcionamento simultâneo (sistema híbrido) gera uma versatilidade muito maior no sistema de controle de climatização do edifício n-ZEB, fazendo com que seja diferenciado quanto a outros tipos de sistemas implantados em outros edifícios.

Para o edifício, existe um resfriador evaporativo para cada caixa de VAV, portanto será demonstrado o controle do sistema para apenas uma caixa aleatória de um ambiente x no pavimento X, já que o funcionamento de todas as outras bombas é semelhante.

É importante ressaltar que as válvulas de boia não foram inclusas nesta lógica, pois seu funcionamento é completamente mecânico e automático (quando a água sobe a tubulação é tapada e quando a água desce a tubulação é aberta).

5.4.1.1 Sistema de segurança do controle das bombas de água e dos *dampers* de saída

Como forma de segurança, os estados dos *dampers* de saída, os estados das bombas e a umidade relativa de cada ambiente serão constantemente mostrados na tela de supervisão para o operador. Com esta supervisão o operador poderá identificar qualquer problema que esteja ocorrendo para corrigi-lo.

As Figuras 5.13 e 5.14 representam o sistema de controle do *free cooling* e sua segurança, conforme descrito anteriormente.

5.4.1.2 Fluxograma do controle para o sistema de resfriamento evaporativo

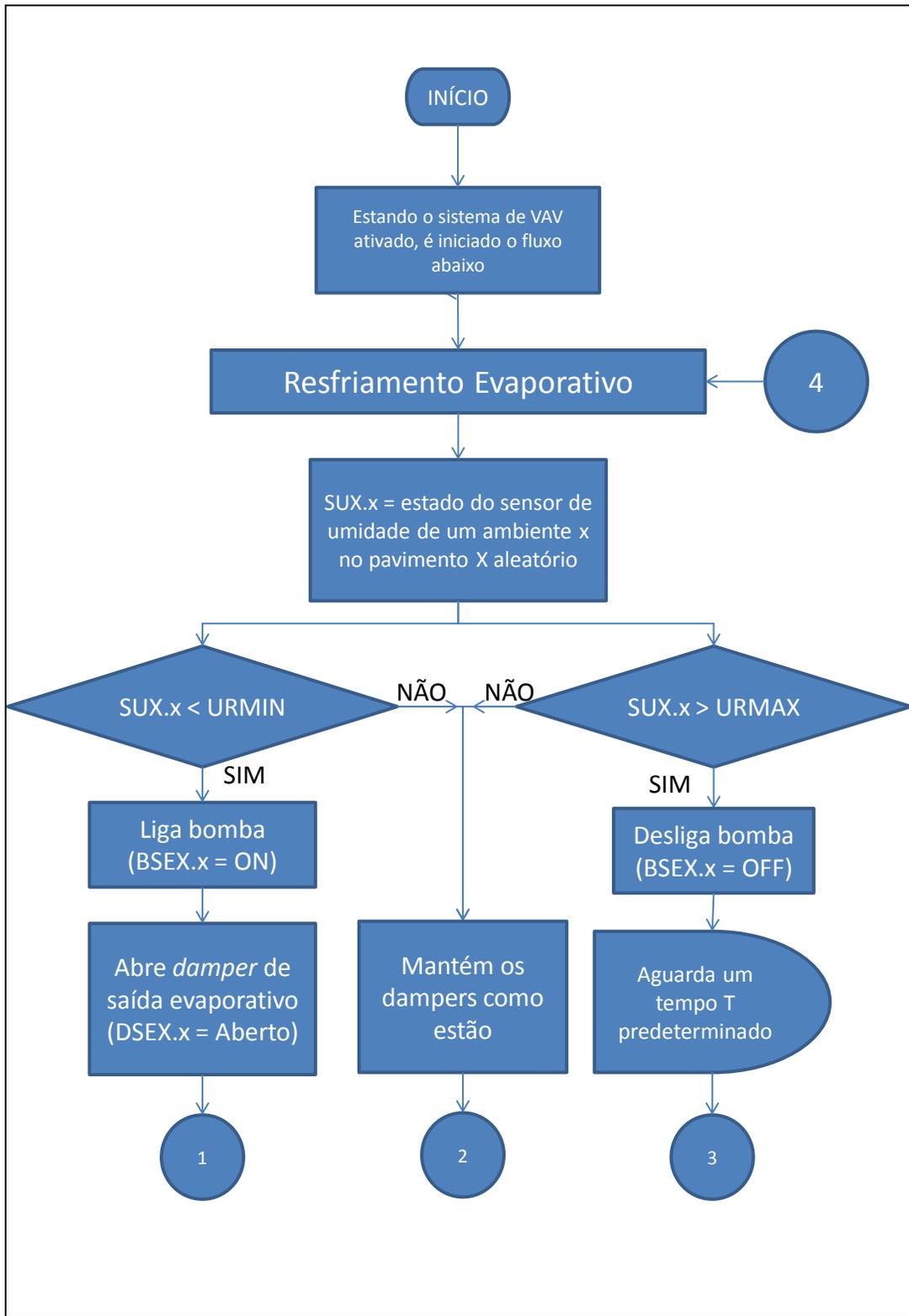


Figura 5.13 Fluxograma do controle para o sistema de resfriamento evaporativo – parte 1

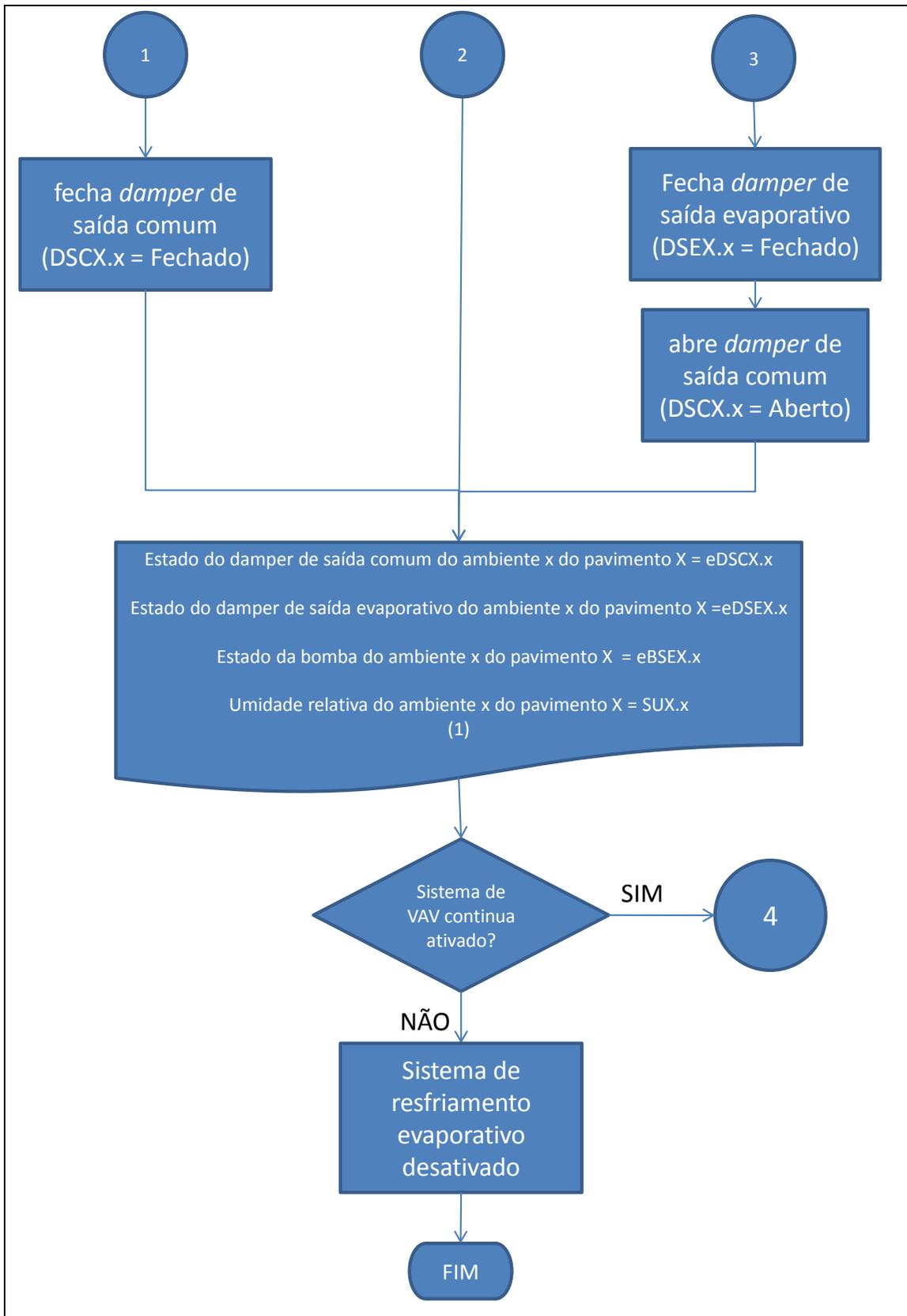


Figura 5.14 Fluxograma do controle para o sistema de resfriamento evaporativo – parte 2

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO ADOTADO

Tendo em vista que todo o sistema de controle foi explicado nos tópicos anteriores através dos textos e fluxogramas, será possível, a partir de agora, desenvolver a implementação e programação do sistema real no edifício quando este for construído.

Como informação adicional, os quantitativos de sensores e atuadores dos três pavimentos são apresentados nos Apêndices III, IV e V. Nesses apêndices são contemplados apenas os sensores e atuadores que ficarão nos ambientes ou no sistema de tubulação sobre os ambientes. Portanto são excluídos os sensores dos sistemas de *chillers* (podem-se encontrar estes sensores no Apêndice II).

Além disso, nos Apêndices VI, VII e VIII, são apresentadas também as plantas baixas dos três pavimentos (Térreo, Primeiro Pavimento e Segundo Pavimento) com as sugestões de posicionamento dos sensores baseados no projeto de controle que foi apresentado durante todo este capítulo. Caso a visualização dos documentos apresentados nos Apêndices seja dificultada devido ao tamanho das fontes, é aconselhado sejam visualizados utilizando os documentos digitalizados que são fornecidos junto a este trabalho.

6 CONCLUSÃO

As lógicas dos três sistemas de climatização do edifício foram feitas para que todos eles operem de acordo com a operação dos demais, trabalhando como um sistema híbrido. Mesmo não havendo relação de continuidade entre todos os fluxogramas, cada um deles está ligado aos outros através dos sensores e atuadores. Por exemplo, o sistema de controle dos *chillers* depende da abertura das válvulas de fluxo. Estas por sua vez dependem da temperatura dos ambientes dos pavimentos, e a temperatura também é usada para que seja feito o controle dos *dampers* das caixas de VAV. Desta forma, com o uso dos sensores e dos atuadores para controle, todos os sistemas estão integrados na mesma lógica.

Além disso, a integração e o funcionamento do sistema para garantir que todos os equipamentos funcionem de forma a atender a carga térmica exata naquele momento faz com que o gasto energético seja reduzido ao menor possível. Isto porque, mesmo em um dia de muito calor, o edifício irá utilizar o mínimo de energia necessário para climatizar o ambiente.

Outra grande vantagem do controle proposto é a possibilidade de dois ou mais sistemas trabalharem simultaneamente. Para fazer a climatização em um dia seco e frio, por exemplo, o *free cooling* será utilizado em conjunto com o sistema de climatização indireta. Já em um dia frio e com alta umidade relativa, o *free cooling* sozinho pode ser responsável pela climatização. Portanto, existem diversas possibilidades de funcionamento dos sistemas, de acordo com as condições climáticas, que fazem com que o gasto energético seja ainda menor.

Diante disto, observa-se que o sistema de controle é responsável pelo funcionamento não só de cada sistema individualmente, mas também faz com que todos eles operem em conjunto como um sistema único de climatização, que chamamos de sistema híbrido.

Conclui-se, por fim, que os objetivos do projeto para redução do gasto energético na climatização foram alcançados. Buscando a utilização de um sistema de controle que alia as aplicações do sistema híbrido (climatização por expansão indireta com *chiller* de condensação a ar melhorado pelo sistema de volume de ar variável (VAV) e com o resfriamento evaporativo direto), foi possível garantir que o sistema funcione em sua máxima eficiência durante qualquer época do ano, diminuindo os gastos e mantendo a filosofia de gasto energético nulo para o edifício n-ZEB.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. NBR 16401, 2008. Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários – Parte 1: Projetos das Instalações. Rio de Janeiro. 2008
- ABNT. NBR 16401, 2008. Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários – Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro. 2008
- ABNT. NBR 16401, 2008. Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários – Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro. 2008
- A geradora. Chiller de Resfriamento. Março de 2015. Disponível em: <www.ageradora.com.br>. Acesso em: 02/09/15.
- Alves, M.B.M. Arruda, S.M. COMO FAZER REFERÊNCIAS: bibliográficas, eletrônicas e demais formas de documentos. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<http://bu.ufsc.br/framerefer.html>>. Acesso em: 2 de setembro de 2015.
- ANSI/ASHRAE. Standard 55-2010. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. (Supersedes ANSI/ASHRAE Standard 55-2004). 2010.
- ANSI/ASHRAE. Standard 62.1-2010. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta. 2010.
- Camargo, J. R. Resfriamento evaporativo: poupando a energia e o meio ambiente. Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. 2003. Páginas 69-75.
- Camargo, J. R. UTILIZAÇÃO DO RESFRIAMENTO EVAPORATIVO PARA CONFORTO TÉRMICO HUMANO EM DIVERSAS CIDADES BRASILEIRAS. Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. 2004. 8 p.
- Campos, P. R. B. Sintonia do compensador PID. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento Acadêmico de Eletrônica. 2014. 8 p.
- CEEETA. Tecnologia de Micro-Geração e Sistemas Periféricos. Parte II – Tecnologia de Aproveitamento de Calor -. Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.
- Corrêa, M.S.A. Condensação a ar x água. 28 de novembro de 2012. Disponível em <<http://www.engenhariaearquitectura.com.br/noticias/623/Condensacao-ar-x-agua.aspx>>. Acesso em: 14 de setembro de 2015.
- Dietrich, D. Bruckner, D. Zucker G. Palensky, P. Communication and Computation in Buildings: A Short Introduction and Overview. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, Vol. 57, No. 11, Novembro de 2010. Páginas 3577 – 3584.
- Dunkleberger, J. Fierko, J. Zarrella J. VAV Systems, AE 390 – Architectural Engineering Design I. 1 de Maio, 2001. Disponível em: <<http://www.pages.drexel.edu/~jmd27/myweb/index.htm>>. Acesso em: 7 de setembro de 2015.

- Faria, C. Fluxograma. Disponível em: <http://www.infoescola.com/administracao_fluxograma/>. Acesso em: 16 de outubro de 2015
- Ferraz, F. Sistemas de Climatização. Centro Federal de Educação Tecnológica. Bahia, Santo Amaro, 2012. 37 Slides, color.
- Ferreira, M. Expansão Direta x Expansão indireta. 8 de Setembro de 2015. Disponível em: <<http://ihvac.blogspot.com.br/2012/09/expansao-direta-x-expansao-indireta.html>>. Acesso em: 13 de setembro de 2015.
- Howstuffworks. Por Dentro de um Ar-Condicionado de Janela. 2013. Disponível em: <www.howstuffworks.com>. Acesso em 28/10/15
- HVAC Problem Solver. The homeowner would like to have free cooling for their house and reduce their air conditioning bill by 20 to 30%. Disponível em: <<http://www.hvacproblemsolver.com/free-cooling.asp>>. Acesso em: 20/09/15.
- INTERNATIONAL STANDARD. ISO 7730. Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Geneva. 15 de Novembro de 2005.
- Johnson, P. 2009 ASHRAE Winter Conference Seminar 67, Back to Basics How Does a Liquid Chiller Work? MCQUAY International Stauton, VA Canada, 18 de novembro de 2008. 33 Slides, color.
- Kinney, L. New Evaporative Cooling Systems: An Emerging Solution for Homes in Hot Dry Climates with Modest Cooling Loads. Midwest Research Institute. National Renewable Energy Laboratory Division. 2004. 22 p.
- Kurnitski, J. Allard, F. Braham, D. Goeders, G. Heiselberg, P. Jagemar, L. Kosonen, R. Lebrun, J. Mazarella, L. Railio, J. Seppanen, O. Schmidt, M. Virta, M. How to define nearly net zero energy buildings nZEB – REHVA proposal for uniformed national implementation of EPBD recast. REHVA - Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations. Maio de 2011. 7 p.
- KMC Controls. ZONE CONTROL WITH VARIABLE AIR VOLUME (VAV). Disponível em: <http://www.kmcccontrols.com/products/Zone_control_with_Variable_Air_Volume_Controls.asp>. Acesso em: 03 de setembro de 2015.
- Lifrieri, J. Fundamentals of HVAC Controls. PDH Course M197. Disponível em: <<http://www.pdhonline.org/>>. Acesso em 22 de outubro de 2015.
- Matias, J. Teoria de Controle PID. Mecatrônica Atual n°3. Abril de 2002.
- Murphy, J. *High-Performance VAV Systems*, ASHRAE JOURNAL, Outubro, 2011. Disponível em: <ashrae.org> Acesso em 02 de setembro de 2015.
- Lopes M, N. Sistema Típico de Ar Condicionado do Tipo Água Gelada. 2011. 22 Slides, Color.
- OGATA, K. Discrete-time control systems. Segunda edição. University of Minesota. Prentice-Hall International. 1995.

- Pereira, P. Menezes, J.M. da Luz, S.F. Automação em Sistema de Ar Condicionado Utilizando Caixa de VAV (Volume de Ar Variável). 19 de Novembro de 2010. Disponível em: <<http://www.webartigos.com/artigos/automacao-em-sistema-de-ar-condicionado-utilizando-caixa-de-vav-volume-de-ar-variavel/52508/>>. Acesso em: 8 de setembro de 2015.
- Swegon air academy, Net Zero Energy. 2012. Disponível em: <<http://www.swegonairacademy.com/2011/12/15/>>. Acesso em 30/10/15
- Tecnogeradores. Como Funciona um Chiller e Como é Feita Sua Manutenção. 29 de Dezembro de 2014. Disponível em: <<http://www.tecnogeradores.com.br/2014/12/como-funciona-um-chiller-e-como-e-feita-sua-manutencao/>>. Acesso em 14/09/15.
- Teixeira, H. P. F. PROPOSTA DE UM EDIFÍCIO DE CARÁTER EXPERIMENTAL SEGUNDO O CONCEITO NZEB PARA A UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de energia mecânica. 26 de Junho de 2015. 103 p.
- The News. Variable Air Volume Systems, 1 de Maio de 2006. Disponível em: <<http://www.achrnews.com/articles/98592-variable-air-volume-systems>>. Acesso em: 08/09/2015.
- Trox Brasil. Unidades de controle: Caixa de VAV Cilíndrica. 2015. Disponível em: <www.troxbrasil.com.br/unidades-de-controle> Acesso em: 20/10/15
- WebArCondicionado. SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO EM PRÉDIOS COMERCIAIS. 25 de Junho de 2013. Disponível em: <<http://www.webarcondicionado.com.br/aparelhos-de-ar-condicionado-em-predios-comerciais>>. Acesso em: 13/09/2015.
- Zhao, Y. Variable air volume (VAV) Air Handling System What Makes VAV Box Performance Better. Johnson Control Australia. 2011. 20 Slides, color.

Apêndices

Apêndice I – Funcionamento básico de um controlador PID

Apêndice II – Lista de pontos para o controle do sistema de climatização do edifício n-ZEB

Apêndice III – Quantitativos de Sensores e atuadores para os ambientes do térreo

Apêndice IV – Quantitativos de Sensores e atuadores para os ambientes do 1º pavimento

Apêndice V – Quantitativos de Sensores e atuadores para os ambientes do 2º pavimento

Apêndice VI – Disposição dos sensores na planta baixa do térreo

Apêndice VII – Disposição dos sensores na planta baixa do 1º pavimento

Apêndice VIII – Disposição dos sensores na planta baixa do 2º pavimento

Apêndice I: Funcionamento básico de um controlador PID

O controlador PID combina o controle proporcional com dois ajustes adicionais, que ajuda na compensação automática caso haja mudanças no sistema. Desta forma ele prende o sistema a um *setpoint* predeterminado (no caso a média das aberturas das válvulas), eliminando a variações bruscas de forma a atenuar o sinal de saída. Basicamente o PID deve ser modelado para que, caso haja uma variação súbita, o sistema não responda muito rapidamente nem muito lentamente. É possível ajustar diversos parâmetros do PID para alterar o tempo de subida (velocidade de resposta), o tempo de acomodação, o *overshoot* (sobressinal) e o erro do PID. A tabela A mostra os efeitos de cada elemento do controlador PID.

Tabela A: Resumo dos efeitos de cada elemento de um controlador PID

	Tempo de subida	Sobressinal	Tempo de acomodação	Erro em regime permanente
Proporcional	Diminui	Aumenta	Pequenas mudanças	Diminui
Integral	Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina
Derivativo	Pequenas mudanças	Diminui	Diminui	Pequenas mudanças

Por exemplo, no caso de uma variação de 50% a 80% de uma vez, o PID faz o sistema subir gradativamente até 80% podendo até passar um pouco deste valor (chamamos este processo de *overshoot*). Se houver um *overshoot* o PID diminui um pouco o sinal até que este atinja um valor próximo 80% desejados. O valor 80% não será atingido, pois todo sistema que tem ação de um controlador gera um erro. Se o PID for modelado corretamente o erro deve ser mínimo para evitar inconsistência do sistema.

A figura I abaixo mostra como um PID funciona. Basicamente as três curvas preta, verde e vermelha, representam a ação do PID modelado com parâmetros diferentes. Na curva preta há um grande *overshoot* (aonde o sinal chega a quase 90%) e um grande tempo de acomodação, mas o tempo de subida é o mais rápido das três curvas.

Na curva vermelha não há *overshoot* e o sistema responde gradativamente alcançando a estabilidade quase ao mesmo tempo da curva verde e mais rápido que a curva preta (tem menor tempo de acomodação quando comparada a curva preta). Contudo o tempo de subida é mais lento que nas outras duas curvas.

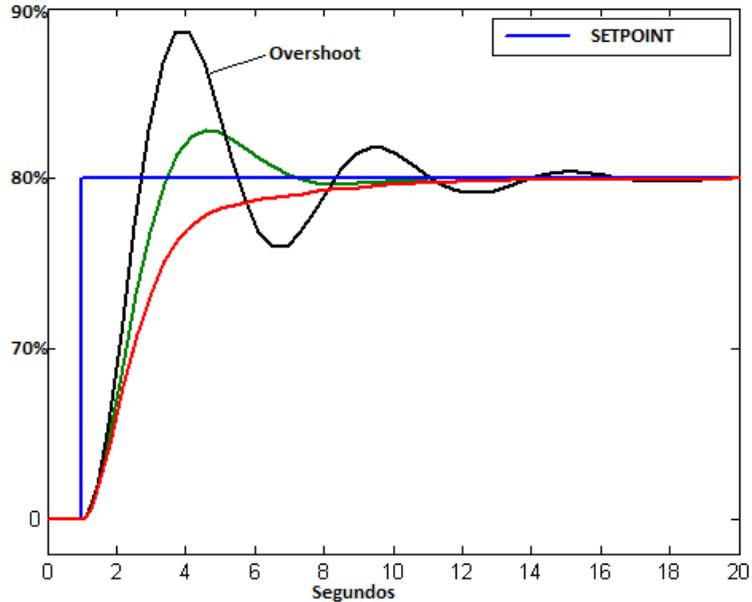


Figura 1 Ação de um PID

Portanto, é importante entender a função que o controlador irá desempenhar para que seus parâmetros sejam modelados de forma a atender a necessidade da melhor forma possível. Não há uma regra geral para qual configuração é melhor. O engenheiro que modela o controlador deve julgar quais as demandas do sistema de acordo com o resultado que se deseja obter.

Este projeto não tem o objetivo de modelar o controlador que será usado em cada parte do sistema. Mesmo que este fosse o objetivo, isto não seria possível sem antes ter um sistema devidamente modelado e com equipamentos escolhidos. Então o que faremos neste caso é mostrar o projeto de como deve ser feito o controle, sendo que as modelagens em si devem ser feitas quando o edifício estiver em um estágio mais avançado.

Apêndice II – Lista de pontos para o controle do sistema de climatização do edifício n-ZEB

Quantidade de Pontos	Sistema controlado	ED	EA	SD	SA	Descrição do ponto	Tag
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Liga/Desliga bomba primária 1	BP1
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Liga/Desliga bomba primária 2	BP2
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Liga/Desliga bomba primária 3	BP3
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Liga/Desliga bomba primária 4	BP4
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Liga/Desliga bomba primária 5	BP5
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Liga/Desliga bomba primária 6	BP6
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Liga/Desliga bomba primária 7	BP7
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Liga/Desliga bomba primária 8	BP8
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado da Bomba primária 1	eBP1
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado da Bomba primária 2	eBP2
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado da Bomba primária 3	eBP3
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado da Bomba primária 4	eBP4
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado da Bomba primária 5	eBP5
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado da Bomba primária 6	eBP6
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado da Bomba primária 7	eBP7
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado da Bomba primária 8	eBP8
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado do relé de sobrecarga da bomba primária 1	RSBP1
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado do relé de sobrecarga da bomba primária 2	RSBP2
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado do relé de sobrecarga da bomba primária 3	RSBP3
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado do relé de sobrecarga da bomba primária 4	RSBP4
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado do relé de sobrecarga da bomba primária 5	RSBP5
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado do relé de sobrecarga da bomba primária 6	RSBP6
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado do relé de sobrecarga da bomba primária 7	RSBP7
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado do relé de sobrecarga da bomba primária 8	RSBP8
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Controle da bomba secundária 1	BS1
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Controle da bomba secundária 2	BS2
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado da bomba secundária 1	eBS1
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado da bomba secundária 2	eBS2
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado do sensor de pressão da bomba secundária 1	PBS1
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado do sensor de pressão da bomba secundária 2	PBS2
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado do relé de sobrecarga da bomba secundária 1	RSBS1
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Estado do relé de sobrecarga da bomba secundária 2	RSBS2
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Liga/desliga compressor A1	A1
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Liga/desliga compressor A2	A2
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Liga/desliga compressor A3	A3
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Liga/desliga compressor A4	A4
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Liga/desliga compressor B1	B1
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Liga/desliga compressor B2	B2
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Liga/desliga compressor B3	B3
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Liga/desliga compressor B4	B4
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Status compressor A1	eA1
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Status compressor A2	eA2
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Status compressor A3	eA3
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Status compressor A4	eA4
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Status compressor B1	eB1
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Status compressor B2	eB2
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Status compressor B3	eB3
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR	1				Status compressor B4	eB4
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Estado do sensor de temperatura da água na saída do Chiller1	TSC1
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Estado do sensor de temperatura da água na saída do Chiller2	TSC2
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Estado do sensor de temperatura da água na chegada dos Chillers	TEC
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Estado do sensor de fluxo de água na tubulação de redundância	SFA
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Controle da válvula do fan-coil no térreo	VT
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Controle da válvula do fan-coil no 1º pavimento	V1
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Controle da válvula do fan-coil no 2º pavimento	V2
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Estado da válvula do fan-coil no térreo	eVT
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Estado da válvula do fan-coil no 1º pavimento	eV1
1	EXPANSÃO INDIRETA COM CHILLER DE CONDENSACÃO A AR			1		Estado da válvula do fan-coil no 2º pavimento	eV2
17	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			17		Estado dos Sensores de Temperatura do térreo	STT.1 - STT.17
9	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			9		Estado dos Sensores de Temperatura internos do 1º pavimento	ST1.1 - ST1.9
4	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			4		Estado dos Sensores de Temperatura externos do 1º pavimento	STE1.1-STE1.4
14	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			14		Estado dos Sensores de Temperatura do 2º pavimento	ST2.1 - ST2.14
17	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			17		Estado dos Sensores de presença do Térreo	SPT.1-SPT.17
9	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			9		Estado dos Sensores de presença do 1º Pavimento	SP1.1- SP1.9
14	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			14		Estado dos Sensores de presença do 2º Pavimento	SP2.1 - SP2.14
1	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			1		Estado do Sensor de CO2 do Térreo	CO2T
2	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			2		Estado dos Sensores de CO2 do 2º Pavimento	CO22.1 - CO22.2
22	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			22		Estado dos sensores de fluxo de ar do Térreo	SFAT.1 - SFAT.22
10	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			10		Estado dos sensores de fluxo de ar do 1º Pavimento	SFA1.1 - SFA1.10
17	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			17		Estado dos sensores de fluxo de ar do 2º Pavimento	SFA2.1 - SFA2.17
1	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			1		Estado do sensor de pressão no Térreo	SPT
1	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			1		Estado do sensor de pressão no 1º Pavimento	SP1
1	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			1		Estado do sensor de pressão no 2º Pavimento	SP2
22	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			22		Controle dos dampers da caixa de VAV do Térreo	DPT.1 - DPT.22
10	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			10		Controle dos dampers da caixa de VAV do 1º Pavimento	DP1.1 - DP1.10
17	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			17		Controle dos dampers da caixa de VAV do 2º Pavimento	DP2.1 - DP2.17
22	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			22		Estado dos dampers das caixas de VAV do Térreo	eDPT.1 - eDPT.22
10	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			10		Estado dos dampers das caixas de VAV do 1º Pavimento	eDP1.1 - eDP1.10
17	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			17		Estado dos dampers das caixas de VAV do 2º Pavimento	eDP2.1 - eDP2.17

Fonte: Própria

Quantidade de Pontos	Sistema controlado	ED	EA	SD	SA	Descrição do ponto	Tag
1	VAV / FREE COOLING				1	Abre/Fecha damper de free cooling do Térreo	DPFCoolT
1	VAV / FREE COOLING				1	Abre/Fecha damper de free cooling do 1º Pavimento	DPFCool1
1	VAV / FREE COOLING				1	Abre/Fecha damper de free cooling do 2º Pavimento	DPFCool2
1	VAV / FREE COOLING			1		Estado do damper de free cooling do Térreo	eDPFCoolT
1	VAV / FREE COOLING			1		Estado do damper de free cooling do 1º Pavimento	eDPFCool1
1	VAV / FREE COOLING			1		Estado do damper de free cooling do 2º Pavimento	eDPFCool2
22	VAV / FREE COOLING				22	Abre/Fecha dampers de Retorno do Térreo	DPRT.1 - DPRT.22
10	VAV / FREE COOLING				10	Abre/Fecha dampers de Retorno do 1º Pavimento	DPR1.1 - DPR2.10
17	VAV / FREE COOLING				17	Abre/Fecha dampers de Retorno do 2º Pavimento	DPR2.1 - DPR2.17
22	VAV / FREE COOLING				22	Estado do dampers de Retorno do Térreo	eDPRT.1 - eDPRT.22
10	VAV / FREE COOLING				10	Estado do dampers de Retornado 1º Pavimento	eDPR1.1 - eDPR2.10
17	VAV / FREE COOLING				17	Estado do dampers de Retornado 2º Pavimento	eDPR2.1 - eDPR2.17
22	VAV / FREE COOLING				22	Abre/Fecha dampers Barométricos do Térreo	DPBT.1 - DPBT.22
10	VAV / FREE COOLING				10	Abre/Fecha dampers Barométricos do 1º Pavimento	DPB1.1 - DPB2.10
17	VAV / FREE COOLING				17	Abre/Fecha damper Barométricos do 2º Pavimento	DPB2.1 - DPB2.17
22	VAV / FREE COOLING				22	Estado dos dampers Barométricos do Térreo	eDPBT.1 - eDPBT.22
10	VAV / FREE COOLING				10	Estado dos dampers Barométricos do 1º Pavimento	eDPB1.1 - eDPB2.10
17	VAV / FREE COOLING				17	Estado dos dampers Barométricos do 2º Pavimento	eDPB2.1 - eDPB2.17
1	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)				1	Controle do Ventilador do fan-coil no térreo	VENTT
1	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)				1	Controle do Ventilador do fan-coil no 1º Pavimento	VENT1
1	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)				1	Controle do Ventilador do fan-coil no 2º Pavimento	VENT2
1	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			1		Estado do Ventilador do fan-coil no térreo	eVENTT
1	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			1		Estado do Ventilador do fan-coil no 1º Pavimento	eVENT1
1	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			1		Estado do Ventilador do fan-coil no 2º Pavimento	eVENT2
1	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			1		Estado do Relé de sobrecarga do ventilador do térreo	RSVENTT
1	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			1		Estado do Relé de sobrecarga do ventilador 1º pavimento	RSVENT1
1	VOLUME DE AR VARIÁVEL (VAV)			1		Estado do Relé de sobrecarga do ventilador do 2º pavimento	RSVENT2
17	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				17	Estado dos Sensores de Umidade do Térreo	SUT.1 - SUT.17
9	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				9	Estado dos Sensores de Umidade do 1º Pavimento	SU1.1 - SU1.9
14	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				14	Estado dos Sensores de Umidade do 2º Pavimento	SU2.1 - SU2.14
22	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				22	Estado dos Sensores nível do Térreo	SNT.1 - SNT.22
10	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				10	Estado dos Sensores de nível do 1º Pavimento	SN1.1 - SN1.10
17	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				17	Estado dos Sensores de nível do 2º Pavimento	SN2.1 - SN2.17
22	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				22	Abre/Fecha dampers de saída evaporativos do Térreo	DSET.1 - DSET.22
10	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				10	Abre/Fecha dampers de saída evaporativos 1º Pavimento	DSE1.1 - DSE1.10
17	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				17	Abre/Fecha dampers de saída evaporativos 2º Pavimento	DSE2.1 - DSE2.17
22	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				22	Estado dos dampers de saída evaporativos do Térreo	eDSET.1 - eDSET.22
10	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				10	Estado dos dampers de saída evaporativos do 1º Pavimento	eDSE1.1 - eDSE1.10
17	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				17	Estado dos dampers de saída evaporativos 2º Pavimento	eDSE2.1 - eDSE2.17
22	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				22	Abre/Fecha dampers de saída comum do Térreo	DSCT.1 - DSCT.22
10	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				10	Abre/Fecha dampers de saída comum 1º Pavimento	DSC1.1 - DSC1.10
17	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				17	Abre/Fecha dampers de saída comum 2º Pavimento	DSC2.1 - DSC2.17
22	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				22	Estado dos dampers de saída comum do Térreo	eDSCT.1 - eDSCT.22
10	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				10	Estado dos dampers de saída comum do 1º Pavimento	eDSC1.1 - eDSC1.10
17	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				17	Estado dos dampers de saída comum 2º Pavimento	eDSC2.1 - eDSC2.17
22	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				22	Liga/Desliga bombas para sistema evaporativo do Térreo	BSET.1 - BSET.22
10	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				10	Liga/Desliga bombas para sistema evaporativo do 1º pavimento	BSE1.1 - BSE1.10
17	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				17	Liga/Desliga bombas para sistema evaporativo do 2º pavimento	BSE2.1 - BSE2.17
22	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				22	Estado das bombas para sistema evaporativo do Térreo	eBSET.1 - eBSET.22
10	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				10	Estado das bombas para sistema evaporativo do 1º pavimento	eBSE1.1 - eBSE1.10
17	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				17	Estado das bombas para sistema evaporativo do 2º pavimento	eBSE2.1 - eBSE2.17
22	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				22	Abre/Fecha válvulas para reservatórios do Térreo	VRT.1 - VRT.22
10	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				10	Abre/Fecha válvulas para reservatórios do 1º Pavimento	VR1.1 - VR1.10
17	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				17	Abre/Fecha válvulas para reservatórios do 2º Pavimento	VR2.1 - VR2.17
22	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				22	Estado das válvulas para reservatórios do Térreo	eVRT.1 - eVRT.22
10	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				10	Estado das válvulas para reservatórios do 1º Pavimento	eVR1.1 - eVR1.10
17	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO DIRETO				17	Estado das válvulas para reservatórios do 2º Pavimento	eVR2.1 - eVR2.17

Fonte: Própria

ED = Entrada Digital

EA = Entrada Analógica

SD = Saída Digital

SA = Saída Analógica

Apêndice III – Quantitativos de sensores e atuadores para os ambientes do Térreo

Pavimento	Tipo de ambiente	Quantidade de ambientes	Caixa VAV	Sensor de temperatura	Sensor de umidade	Sensor de presença	Sensor de CO2	Sensor de Fluxo de ar	Sensor de pressão	Válvula de boia	Damper	Damper de Free Cooling	Damper de retorno	Damper Barométrico	Damper de saída evaporativo	Damper de saída comum	Bomba p/ sistema evaporativo
TÉRREO	Laboratório	2	4	2	2	2	0	4	0	4	4	0	4	4	4	4	4
	Sala multiuso vinculada ao laboratório	2	2	2	2	2	0	2	0	2	2	0	2	2	2	2	2
	Lixeira	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Depósito	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Banheiros	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sala para empresas	4	4	4	4	4	0	4	0	4	4	0	4	4	4	4	4
	Sala administrativa	6	6	6	6	6	0	6	0	6	6	0	6	6	6	6	6
	Sala de conferência	1	4	1	1	1	1	4	0	4	4	0	4	4	4	4	4
	Sala do tradutor	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
	Controle do som	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
	Área técnica	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Hall de Entrada	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Paredes Externas	N/A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Dutos de ar	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1	N/A	N/A	1	N/A	N/A	N/A	N/A
Total	N/A	34	22	17	17	17	1	22	1	22	22	1	22	22	22	22	

Fonte: Própria.

Apêndice IV – Quantitativos de sensores e atuadores para os ambientes do 1º pavimento

Pavimentos	Tipo de ambiente	Quantidade de ambientes	Caixa VAV	Sensor de temperatura	Sensor de umidade	Sensor de presença	Sensor de CO2	Sensor de Fluxo de ar	Sensor de pressão	Válvula de boia	Damper	Damper de Free Cooling	Damper de retorno	Damper Barométrico	Damper de saída evaporativo	Damper de saída comum	Bomba p/ sistema evaporativo
1º PAVIMENTO	Sala de reuniões	2	2	2	2	2	0	2	0	2	2	0	2	2	2	2	2
	Lixeira	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Depósito	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Banheiros	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sala para pesquisadores	2	2	2	2	2	0	2	0	2	2	0	2	2	2	2	2
	Sala para professor coordenador	2	2	2	2	2	0	2	0	2	2	0	2	2	2	2	2
	Sala multiuso	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
	Hall de mesas	1	2	1	1	1	0	2	0	2	2	0	2	2	2	2	2
	Hall de sofás	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
	Paredes Externas	N/A	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Dutos de ar	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1	N/A	N/A	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Total	N/A	19	10	13	9	9	0	10	1	10	10	1	10	10	10	10	

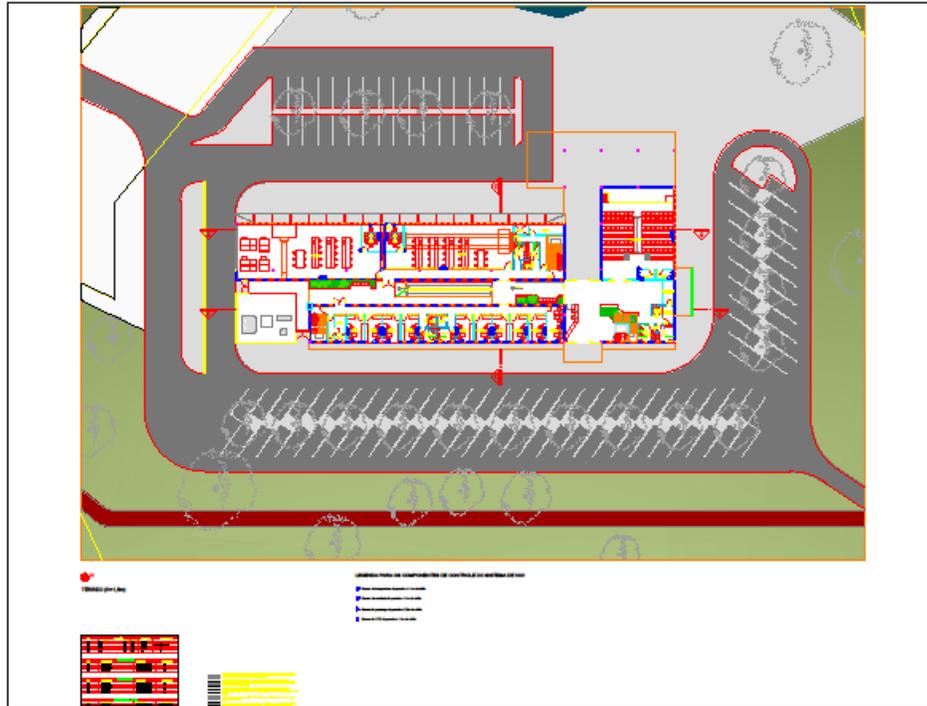
Fonte: Própria.

Apêndice V – Quantitativos de sensores e atuadores para os ambientes 2º pavimento

Pavimentos	Tipo de ambiente	Quantidade de ambientes	Caixa VAV	Sensor de temperatura	Sensor de umidade	Sensor de Presença	Sensor de CO2	Sensor de fluxo de Ar	Sensor de pressão	Válvula de boia	Damper	Damper de Free Cooling	Damper de retorno	Damper Barométrico	Damper de saída evaporativo	Damper de saída comum	bomba p/ sistema evaporativo
2º PAVIMENTO	Laboratório	2	4	2	2	2	0	4	0	4	4	0	4	4	4	4	4
	Sala multiuso vinculada ao laboratório	2	2	2	2	2	0	2	0	2	2	0	2	2	2	2	2
	Lixeira	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Depósito	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Banheiros	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sala de reuniões	2	2	2	2	2	0	2	0	2	2	0	2	2	2	2	2
	Sala para pesquisadores	2	2	2	2	2	0	2	0	2	2	0	2	2	2	2	2
	Sala para professor coordenador	2	2	2	2	2	0	2	0	2	2	0	2	2	2	2	2
	Sala multiuso	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
	Sala multiuso grande	2	3	2	2	2	2	3	0	3	3	0	3	3	3	3	3
	Hall de sofás	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
	Paredes externas	N/A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Dutos de ar	N/A	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
Total	N/A	25	17	14	14	14	2	17	1	17	17	1	17	17	17	17	17

Fonte: Própria.

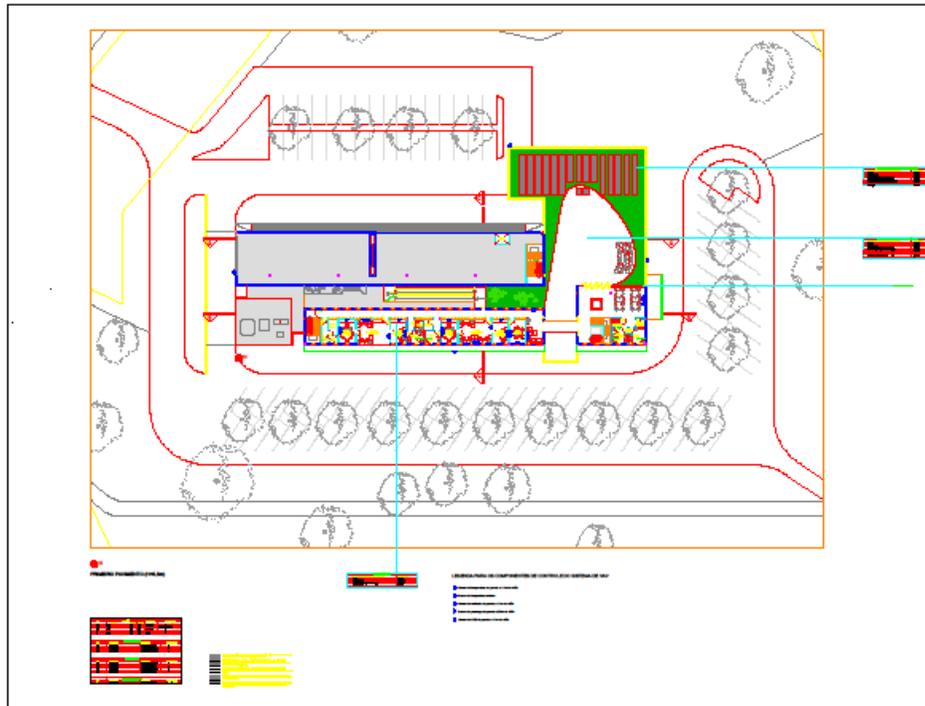
Apêndice VI – Disposição dos sensores na planta baixa do térreo



Fonte: Própria.

É aconselhado que este projeto seja visualizado utilizando os documentos digitalizados que são apresentados neste trabalho. O formato é DWG, portanto há necessidade do uso do software *Autocad*.

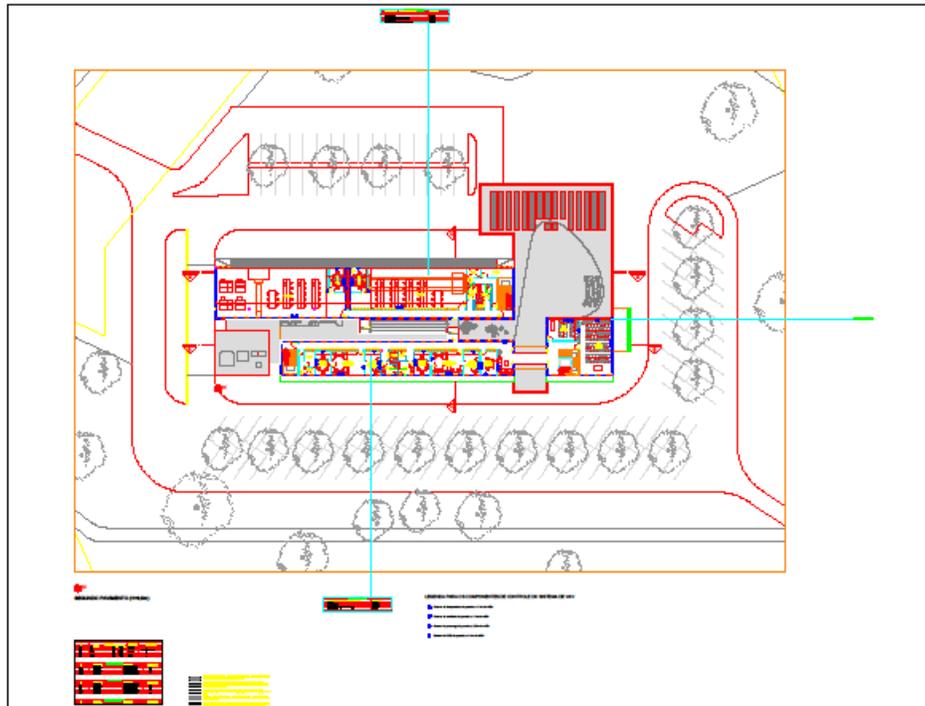
Apêndice VII – Disposição dos sensores na planta baixa do 1º pavimento



Fonte: Própria.

É aconselhado que este projeto seja visualizado utilizando os documentos digitalizados que são apresentados neste trabalho. O formato é DWG, portanto há necessidade do uso do software *Autocad*.

Apêndice VIII – Disposição dos sensores na planta baixa do 2º pavimento



Fonte: Própria.

É aconselhado que este projeto seja visualizado utilizando os documentos digitalizados que são apresentados neste trabalho. O formato é DWG, portanto há necessidade do uso do software *Autocad*.